

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25
19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

**ลักษณะเฉพาะการเดือดแบบพูลของของไหลนาโนชนิดอลูมินาร์ผสมกับน้ำ
บนผิวให้ความร้อนทรงกระบอกที่วางในแนวนอน**
**Pool Boiling Characteristics of Al_2O_3 -Water Nanofluids on a Horizontal
Cylindrical Heating Surface**

ทแก้ว เยี่ยมสวัสดิ์¹, วีระพันธ์ ด้วงทองสุข^{*2} สมชาย วงศ์วิเศษ¹

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัย FUTURE Lab. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพฯ 10160

*ผู้ติดต่อ: wdaungthongsuk@yahoo.com, โทรศัพท์ +662-807-4500 ต่อ 301, โทรสาร +662-807-4529

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองในการหาลักษณะเฉพาะของเนื่องจากการเดือดแบบพูล (Pool boiling) ของของไหลนาโนชนิดที่ใส่อนุภาคของอลูมินาร์ลงไปในน้ำ (Al_2O_3 -water nanofluid) บนพื้นผิวให้ความร้อน (Boiling test section) แบบทรงกระบอกที่วางอยู่ในแนวนอน ของไหลนาโนที่ใช้ในการศึกษานี้มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 0.00005 ถึง 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และพื้นผิวให้ความร้อนที่ใช้ทำมาจากทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.85 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร และมีความขรุขระบนพื้นผิวเท่ากับ 3.14 ไมโครเมตร สำหรับวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือศึกษาผลของความเข้มข้นของของไหลนาโนและความดัน ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและฟลักซ์ความร้อน โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของน้ำ ซึ่งความดันที่ใช้ในการศึกษา คือ ที่ 1 และ 2 บรรยากาศ ตามลำดับ

ในส่วนของการสอบเทียบอุปกรณ์การทดลองที่สร้างขึ้นนั้น จะนำผลที่ได้จากข้อมูลการทดลองของน้ำมาเปรียบเทียบกับสมการการเดือดแบบพูลของ Rohsenow ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั้นให้ค่าที่สอดคล้องกับการทำนายโดยใช้สมการของ Rohsenow นอกจากนั้นจากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและฟลักซ์ความร้อนของของไหลนาโนชนิดอลูมินาร์ผสมกับน้ำ มีค่าที่น้อยกว่าน้ำปกติ มีค่าแปรผันตามความดัน และแปรผกผันกับความเข้มข้นของของไหลนาโน

คำสำคัญ: การเดือดแบบพูล, ของไหลนาโน, สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, ความเข้มข้นของอนุภาค

Abstract

This research presents an experimental investigation on the pool boiling characteristics of Al_2O_3 -water nanofluids on a horizontal cylindrical heating surface. Al_2O_3 -water nanofluids with particles concentrations of 0.00005 and 0.03 vol.% are used as working. Boiling heating surface made from

copper with diameter of 2.85 cm, 9 cm length and surface roughness of $3.14 \mu\text{m}$ is used as the test section. The effects of particle concentration and saturation pressure on the heat transfer coefficient and heat flux are investigated and then compared with the data for pure water. The saturation pressures used in this study are 1 and 2 atm, respectively.

In order to validate the accuracy of the experimental system, the well-known Rohsenow equation is used to compare with the measured data for pure water. The results show good agreement between the experimental results and the calculated values for pure water. Moreover, the experimental results show that the heat transfer coefficient and heat flux of nanofluids is lower than that of the pure water. Similarly, the heat transfer coefficient and heat flux increase with an increasing in the saturation pressure and decrease with increasing the particle concentrations.

Keywords: pool boiling, nanofluid, heat transfer coefficient, particle concentration

1. บทนำ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ทางพลังงานชิ้นหนึ่งที่สำคัญ พบได้ทั่วไปในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น หม้อไอน้ำ, ระบบระบายความร้อนในเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, ระบบทำความเย็นหรือระบบปรับอากาศ เป็นต้น นอกจากนี้ ปัจจุบันโลกกำลังประสบปัญหาทางด้านพลังงาน ดังนั้นแนวทางการวิจัย, ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความสนใจ ซึ่งก็รวมถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย โดยของไหลทำงานที่ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะมีส่วนที่มีการเปลี่ยนสถานะ (ระหว่างของเหลวกับไอ) และไม่มีการเปลี่ยนสถานะ อย่างไรก็ตาม การแลกเปลี่ยนความร้อนในกรณีที่มีการเปลี่ยนสถานะ จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ โดยที่กลไกการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูล (Pool boiling heat transfer) ถือเป็นกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูล นั้นสามารถพัฒนาได้ในสองส่วนด้วยกัน คือ 1) พัฒนาในส่วนของพื้นผิวให้ความร้อน

และ 2) พัฒนาในส่วนของการสารทำงานที่ใช้ภายในระบบ ซึ่งในส่วนของการพัฒนาสารทำงาน ที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูล ได้มีการพัฒนาในหลายๆ วิธีด้วยกัน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันวิธีหนึ่งที่มีความสนใจอย่างมาก คือ การใส่อนุภาคของแข็งที่มีค่าการนำความร้อนสูงลงไปของไหลฐาน (Base fluids) เพื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนให้แก่ของไหลทำงาน โดยที่ Choi [1] ได้ให้คำนิยามของการใส่อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ลงไปในของไหลฐานนี้ว่า "ของไหลนาโน" (Nanofluid) ซึ่งกรณีการใช้ของไหลนาโนนี้กับการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาแบบบังคับนั้น นักวิจัยหลายๆ ท่าน รายงานว่า สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ ระหว่าง 7 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณ [2-9] ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลที่ว่าของไหลนาโน มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าของไหลฐาน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ใช้ของไหลนาโนกับการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลนั้นพบว่ามีไม่มากนัก และยังให้ผลที่ขัดแย้งกันอยู่บ้าง ซึ่งเอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของการเดือดแบบพูลของของไหลนาโน ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

Das และคณะ [10] ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลของของไหลนาโน โดยใช้อนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์ขนาดประมาณ 58.4 นาโนเมตรใส่ลงในน้ำ (Al_2O_3 -water nanofluid) ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยพื้นผิวให้ความร้อนมีลักษณะเป็นท่อวางในแนวนอน (Horizontal tube) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 4, 6.5 และ 20 มิลลิเมตร ค่าความขรุขระของพื้นผิวให้ความร้อนอยู่ระหว่าง 0.37 ถึง 0.45 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าความขรุขระของพื้นผิวให้ความร้อนมากขึ้นทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลนาโนพบว่าทำให้ลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลนั้นลดลง

You และคณะ [11] ศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเดือดแบบฟูล ของของไหลนาโนชนิดที่ใส่อนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์ลงในน้ำ โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.001 ถึง 0.05 กรัมต่อลิตร พื้นผิวให้ความร้อนทำมาจากทองแดง ซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10×10 ตารางมิลลิเมตร วางในแนวนอน และวัดค่าความต้านทานได้เท่ากับ 25 โอห์ม ในระหว่างทำการทดลองจะรักษาความดันและอุณหภูมิไว้ที่ 2.89 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของของไหลนาโนนั้นสูงกว่าน้ำ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของของไหลนาโน โดยที่เมื่อความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 กรัมต่อลิตร ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจะเพิ่มขึ้นถึง 200 เปอร์เซ็นต์

Li และคณะ [12] ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูล ของของไหลนาโน ชนิดที่ใส่วิลลิคอนไดออกไซด์ขนาด 25 นาโนเมตรลงในน้ำ (SiO_2 -water nanofluid) โดยความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดย

น้ำหนัก สำหรับพื้นผิวให้ความร้อนทำจากลวดแพลตตินัม (Pt wire) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร และทำการทดลองภายใต้การเดือดแบบเย็นเยือก (Subcooled boiling) ที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่าที่สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนนั้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของของไหลนาโน และมีค่าสูงกว่าน้ำ

Vassallo และคณะ [13] ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลของของไหลนาโน ชนิดที่ใส่อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 15 และ 50 นาโนเมตร และ 3 ไมโครเมตร ลงในน้ำ โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สำหรับพื้นผิวให้ความร้อนทำจากลวดนิกเกิลโครเมียม (NiCr wire) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 75 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของของไหลนาโน เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงกว่าน้ำ

Bang และ Chang [14] ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลของของไหลนาโนชนิดอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ขนาดประมาณ 47 นาโนเมตร ลงในน้ำ โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.5 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พื้นผิวให้ความร้อนทำมาจากทองแดง ลักษณะหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 4×100 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งวางในแนวนอนและแนวตั้ง จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลนาโน จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลนั้นลดลง ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพ พบว่าที่ฟลักซ์ความร้อนมากกว่า 100 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ของไหลนาโน มีลักษณะของการเดือดที่รุนแรงน้อยกว่าน้ำ และค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของของไหลนาโน จะมีสูงกว่าน้ำ นอกจากนั้นพบว่า พื้นผิวให้ความร้อนวางในแนวราบและแนวตั้งพบว่ามีค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูงกว่าน้ำ

ประมาณ 32 เปอร์เซ็นต์ และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Kim และคณะ [15] ศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของการเดือดแบบพูลของของไหลนาโน ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ขนาด 85 นาโนเมตร และอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 47 นาโนเมตร ลงไปในน้ำ โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.00001 ถึง 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยพื้นผิวให้ความร้อนทำมาจากลวดนิกเกิลโครเมียมขนาด 0.2 มิลลิเมตร และลวดไททาเนียม (Ti wire) ขนาด 0.5 มิลลิเมตร จากผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตนั้นแปรผันตามความเข้มข้นของของไหลนาโน และมีค่าสูงกว่าน้ำ

Nguyen และคณะ [16] ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลของของไหลนาโนที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้อนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ขนาด 47 นาโนเมตรลงไปในน้ำกลั่น (Distilled water) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สำหรับพื้นผิวให้ความร้อนนั้นทำจากทองแดงที่เคลือบด้วยโครเมียม มีลักษณะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร วางในแนวนอน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของของไหลนาโน สูงขึ้น จะทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลลดลง เมื่อเทียบกับน้ำ

Kim และคณะ [17] ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลของของไหลนาโน ชนิดที่ใส่อนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์, เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ลงไปในน้ำ โดยอนุภาคเหล่านี้มีความเข้มข้นระหว่าง 0.001 ถึง 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พื้นผิวให้ความร้อนทำจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel wire) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.381 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร และแบบแผ่นเรียบวางในแนวนอน มีขนาด

5×45 ตารางมิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของของไหลนาโน และมีค่าสูงกว่าน้ำ โดยที่อนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์นั้นเพิ่มขึ้นประมาณ 52 เปอร์เซ็นต์, เซอร์โคเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Liu และคณะ [18] ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลของของไหลนาโน ที่ใส่อนุภาคออกไซด์ของทองแดง (CuO) ขนาด 50 นาโนเมตร ลงไปในน้ำและเอทิลแอลกอฮอล์, อนุภาคของซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 35 นาโนเมตร ใส่ลงไปในน้ำและเอทิลแอลกอฮอล์ โดยของไหลนาโนนั้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พื้นผิวให้ความร้อนทำมาจากทองแดง เป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร วางในแนวนอน จากผลการทดลองพบว่า จุดฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของของไหลนาโน มีสูงกว่าของไหลฐาน

Golubovic และคณะ [19] ศึกษาการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของของไหลนาโนชนิดที่ใส่อนุภาคบิสมัทไดออกไซด์ (BiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ ลงในน้ำ โดยมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 0.0005714 ถึง 0.0064615 กรัมต่อลิตรพื้นผิวให้ความร้อนทำมาจากลวดนิกเกิลโครเมียมขนาด 0.64 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตแปรผันตามความเข้มข้นของของไหลนาโนเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงกว่าน้ำ โดยที่อนุภาคบิสมัทไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

Trisaksri และ Wongwises [20] ศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพูลของของไหลนาโนที่มีอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์แขวนลอยในสารทำความเย็น

R141b โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.01 ถึง 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พื้นผิวให้ความร้อนมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28.5 มิลลิเมตร ยาว 90 มิลลิเมตร วางในแนวนอน ค่าความขรุขระของพื้นผิวเท่ากับ 3.14 ไมโครเมตร โดยทำการทดลองที่ความดัน 200 ถึง 500 กิโลปาสกาล จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลจะลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลนาโน และจะแปรผันตามค่าความดัน

Suriyawong และ Wongwises [21] ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลของของไหลนาโน ชนิดที่ใส่อนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 21 นาโนเมตรลงไปในน้ำ โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 0.00005 ถึง 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยพื้นผิวให้ความร้อนทำมาจากทองแดงและอลูมิเนียม ที่มีค่าความขรุขระของพื้นผิวเท่ากับ 0.2 และ 4 ไมโครเมตร โดยทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของของไหลนาโน และพื้นผิวที่มีความขรุขระเท่ากับ 0.2 ไมโครเมตร จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าที่ความขรุขระของพื้นผิวเท่ากับ 4 ไมโครเมตร และกรณีของผิวทองแดงพบว่าเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 0.0001 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นมีความต่ำกว่าน้ำ แต่สำหรับพื้นผิวอลูมิเนียม นั้น ทุก ๆ ความขรุขระ และทุก ๆ ความเข้มข้นนั้น พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่น้อยกว่าน้ำเสมอ

จากการสำรวจเอกสาร พบว่าการศึกษาลักษณะเฉพาะเนื่องจากการเดือดแบบฟูลของของไหลนาโน บนผิวให้ความร้อนลักษณะต่าง ๆ ยังมีอยู่ไม่มากนัก และให้ผลขัดแย้งกันบ้าง โดยนักวิจัยบางท่านรายงานว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นแปรผันตามความเข้มข้นของของไหลนาโน [11, 12, 13, 15, 17, 18, 19] ส่วนบางท่านรายงานว่า

แปรผกผันกับความเข้มข้น [10, 14, 16, 20, 21] และเกือบทั้งหมดทดลองที่ความดันบรรยากาศเท่านั้น ยกเว้นงานของ Trisaksri และ Wongwises [20] ที่ศึกษาผลของความดัน ด้วย นอกจากนั้นนักวิจัยเหล่านั้นก็ไม่ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนต่าง ๆ เช่น ค่าการนำความร้อน, ความร้อนจำเพาะ และความหนืด ที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูล ควบคู่กันไป ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาเชิงทดลองเพิ่มเติมเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูล เพื่อจะยืนยันผลการทดลองที่ขัดแย้งกัน ดังที่กล่าวไว้เบื้องต้น พร้อมกับทำการทดลองเพื่อวัดค่าความร้อนจำเพาะ, ค่าการนำความร้อน และค่าความหนืดของของไหลนาโน ควบคู่กันไปด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ของไหลนาโนชนิดที่ใส่อนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์ลงไปในน้ำ โดยความเข้มข้นที่ใช้มีค่าระหว่าง 0.00005 ถึง 0.03 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และพื้นผิวให้ความร้อนทำมาจากทองแดงมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกวางในแนวนอน โดยจะศึกษาผลของความเข้มข้นและความดันที่มีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูล และทำการเปรียบเทียบกับน้ำ

2. การเตรียมของไหลนาโน

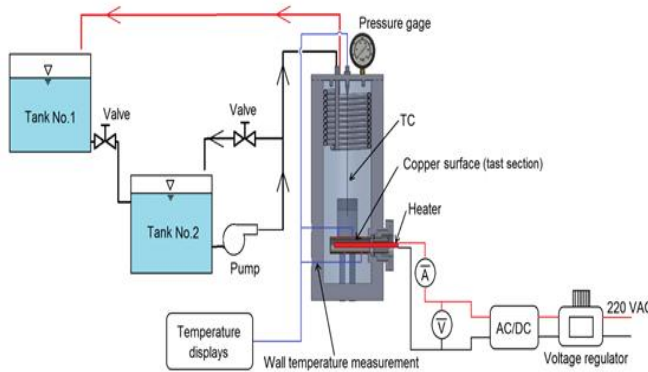
ของไหลนาโนที่ใช้ในการศึกษานี้ คือของไหลนาโนชนิดใส่อนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์ลงไปในน้ำ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอนุเคราะห์จากบริษัท DEGUSSA จำกัด ประเทศไทย เป็นผลิตภัณฑ์ภายใต้รหัส AeroDisp. W630 โดยมีอนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 120 นาโนเมตร แว่นลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อต้องการความเข้มข้นอื่น ๆ สามารถทำได้โดยการเติมน้ำลงไปเจือจาง (Dilution) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นตามค่าที่ต้องการ คือ 0.00005, 0.0001, 0.005 และ

0.03 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากนั้นทำการกระจายโดยใช้เครื่องสั่นเหนือเสียง (Ultrasonic vibrator) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนการทดลองทุกครั้ง

3. อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ ด้วยกัน คือ ถังรับความดัน (Pressure vessel), คอยล์หล่อเย็น, ถังเก็บน้ำหล่อเย็น จำนวน 2 ถัง (Storage tank), ผิวให้ความร้อน (Boiling heating surface) และชุดป้อนไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับถังรับความดันนั้น ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ภายในบรรจุของไหลที่ใช้ในการทดลอง และทำการหุ้มฉนวนภายนอกเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ในบริเวณส่วนบนภายในถังนั้นจะทำการติดตั้งคอยล์เย็นไว้สำหรับควบคุมความดันภายในถัง โดยมีหลักการคือเมื่อความดันภายในถังสูงขึ้นมากกว่าค่าที่ต้องการแล้ว จะทำการสูบน้ำจากถังเก็บหมายเลข 1 เข้าไปในคอยล์เย็น และไหลไปเก็บในถังหมายเลข 2 ก่อน ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นได้ ทำให้ความดันภายในถัง ลดลง นอกจากนั้นเมื่อไ

ร้อนจากการเดือดสัมผัสกับผิวคอยล์เย็น แล้ว จะควบแน่นเป็นของเหลวอีกครั้งหนึ่งและไหลกลับลงไป ในถังอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเป็นการควบคุมค่าความเข้มข้นของของไหลนาโนให้คงที่ตลอดการทดลอง สำหรับอุณหภูมิของผิวให้ความร้อน 4 ตำแหน่งและอุณหภูมิของของไหลนั้น วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด T (T type thermocouple)

สำหรับรายละเอียด ของผิวให้ความร้อนที่ใช้ในการทดลอง จะประกอบด้วย ฮีตเตอร์แบบแท่ง ขนาด 2 กิโลวัตต์ ที่ถูกฝังอยู่ภายในแท่งทองแดง ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.5 มิลลิเมตร ยาว 90 มิลลิเมตร โดยที่ปลายทั้งสองของแท่งทองแดงจะถูกหุ้มด้วยฉนวน เพื่อเป็นการบังคับให้ความร้อนจากฮีตเตอร์ ส่งไปยังพื้นผิวของผิวให้ความร้อนทางด้านข้าง (แนวนอน) เท่านั้น โดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด T สำหรับวัดอุณหภูมิผิวให้ความร้อนนั้น จะติดตั้งทั้งหมด 4 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งจะเยื้องกัน 90 องศา และบริเวณหัววัดอุณหภูมินั้นจะถูกเชื่อมติดกับผิวให้ความร้อนภายนอกโดยตรงโดยที่สายของเทอร์โมคัปเปิลนั้น จะถูกซ่อนอยู่ภายใน เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนต่อพื้นที่ผิวความร้อน และการเคลื่อนที่ของฟองไอร่ระหว่างที่เกิดการเดือด

3.2 อุปกรณ์วัดค่าสมบัติทางความร้อนและกายภาพ ของของไหลนาโน

สำหรับอุปกรณ์วัดค่าสมบัติทางความร้อนและกายภาพ (Thermophysical property) ของของไหลนาโน ทั้งการนำความร้อนและความร้อนจำเพาะนั้น เป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาเองในห้องปฏิบัติการวิจัย FUTURE lab. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งมีรายละเอียดคร่าว ๆ คือ ค่าการนำความร้อนนั้นจะใช้หลักการวัดที่เรียกว่า Transient hot-wire technique ในการวัด ส่วนค่าความร้อนจำเพาะนั้นจะใช้เทคนิคการวัดที่เรียกว่า Comparison calorimeter โดยอยู่บน

พื้นฐานของหลักการ Differential Thermal Analysis (DTA) ซึ่งเป็นหลักการวิเคราะห์เชิงความร้อน ในรูปของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิงที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะที่แน่นอน

4. ขั้นตอนการคำนวณ

สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและฟลักซ์ความร้อน เนื่องจากการเดือดแบบฟูลของของไหล นั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ ของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูล

- สำหรับค่าฟลักซ์ความร้อน (q) โดยใช้สมการที่ (1) คือ

$$q = \frac{IV}{A} \quad (1)$$

โดยที่ I คือกระแสไฟฟ้า (แอมป์), V คือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์) และ A คือพื้นที่ผิวให้ความร้อน (ตารางเมตร)

- ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย เนื่องจากการเดือดแบบฟูล (h_b , วัดต่อตารางเมตร องศาเซลเซียส) คำนวณโดยใช้สมการที่ (2)

$$h_b = \frac{q}{T_h - T_{sat}} \quad (2)$$

โดยที่ T_{sat} คืออุณหภูมิอิ่มตัวของของไหล (องศาเซลเซียส) และ T_h คืออุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวให้ความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$T_h = \frac{T_{h,top} + 2T_{h,side} + T_{h,bottom}}{4} \quad (3)$$

โดยที่ $T_{h,top}$, $T_{h,side}$ และ $T_{h,bottom}$ คือ อุณหภูมิในตำแหน่งบนผิวให้ความร้อน

ในส่วนของการสอบเทียบความถูกต้อง แม่นยำของอุปกรณ์การทดลองที่ได้สร้างขึ้น นั้น จะทำการสอบเทียบโดยใช้สมการของ Rohsenow [22] โดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน ซึ่งรูปแบบของสมการ นั้น ดังที่แสดงในสมการที่ (4)

$$q = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \left[\frac{C_p(T_h - T_{sat})}{C_{sf} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3 \quad (4)$$

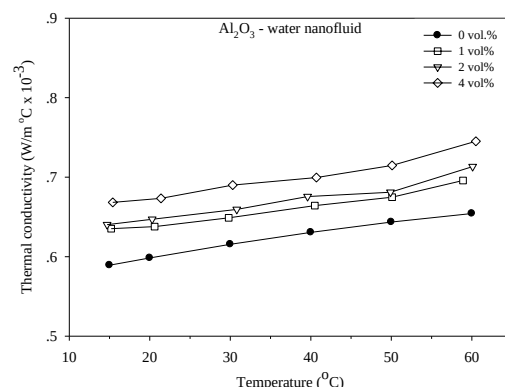
โดยที่ μ คือ ความหนืดของของไหล, ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, σ คือ แรงตึงผิวของของไหล C_p คือ ความร้อนจำเพาะ, h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝง, Pr คือ เลขพราวน์เดิล, C_{sf} และ n คือ ค่าคงที่ระหว่างผิวให้ความร้อนกับของไหล สำหรับกรณีนี้ผิวทองแดงกับน้ำ ซึ่งมีค่าคือ 0.013 และ 1.0 ตามลำดับ สำหรับตัวห้อย l และ v นั้น หมายถึงสถานะของเหลวและสถานะไอ ตามลำดับ

5. ผลการทดลอง

สำหรับในส่วนของการทดลองนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ผลการทดลองในส่วนของการวัดค่าสมบัติทางความร้อนและกายภาพ กับผลการทดลองในส่วนของการสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการเดือดแบบฟูล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 ผลการทดลองค่าคุณสมบัติทางความร้อนและกายภาพ

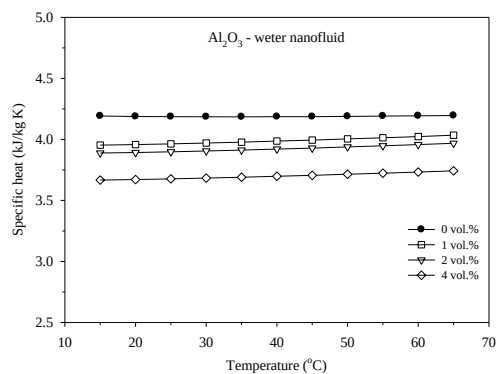
สิ่งสำคัญประการหนึ่งของงานวิจัยนี้ คือ การวัดค่าคุณสมบัติทางความร้อนและกายภาพของของไหลนาโน ซึ่งประกอบด้วย ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อน ซึ่งจะทำให้การวัดที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 15 ถึง 65 องศาเซลเซียส เพื่อดูสมรรถนะทางด้านความร้อนของของไหลนาโน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับอุณหภูมิของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนของของไหลนาโนนั้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นและอุณหภูมิของของไหลนาโน ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่ใส่ลงไปนั้นช่วยทำให้ค่าการนำความร้อนสูงขึ้น

ในส่วนของการคำนวณการพาความร้อนของของไหลนาโน นั้นสามารถดูได้จากรูปที่ 3 ซึ่งจากผลการวัดพบว่า เมื่อค่าความเข้มข้นของของไหลนาโนสูงขึ้นจะทำให้ค่าการพาความร้อนจำเพาะลดลง ขณะเดียวกันค่าการพาความร้อนจำเพาะจะแปรผันตามอุณหภูมิ



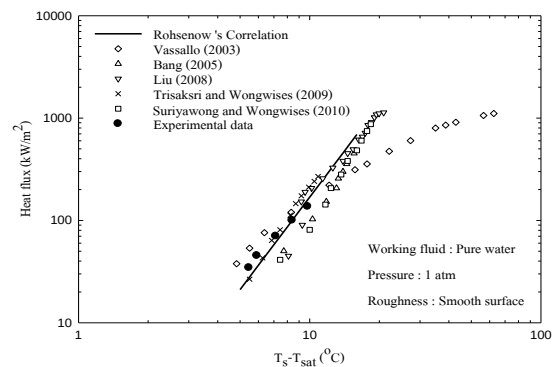
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการพาความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ซึ่งจากผลการวัดค่าคุณสมบัติทางความร้อนต่าง ๆ นี้ จะถูกใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุลงของของไหลนาโน ต่อไป

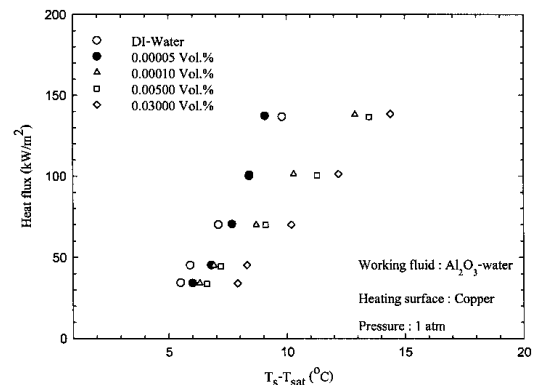
5.2 ผลการทดลองในส่วนของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบพุลง

ก่อนที่จะทำการวัดค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน นั้น จะต้องทำการสอบเทียบอุปกรณ์การทดลองที่สร้างขึ้นมานี้ กับสมการของ Rohsenow [22] เพื่อยืนยันความถูกต้องแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยในที่นี้จะใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน นอกจากนั้นยังได้นำผลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่น ๆ มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจากผล

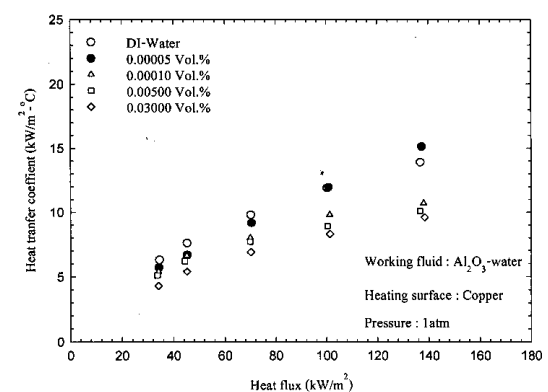
การสอบเทียบ พบว่าผลที่ได้จากการวัดจากอุปกรณ์การทดลองที่ได้ดำเนินการสร้างนี้ มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ Rohsenow [22] และสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดของนักวิจัยท่านอื่น ๆ ด้วย



รูปที่ 4 ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ Rohsenow เปรียบเทียบกับค่าจากการวัดของนักวิจัยท่านอื่น ๆ

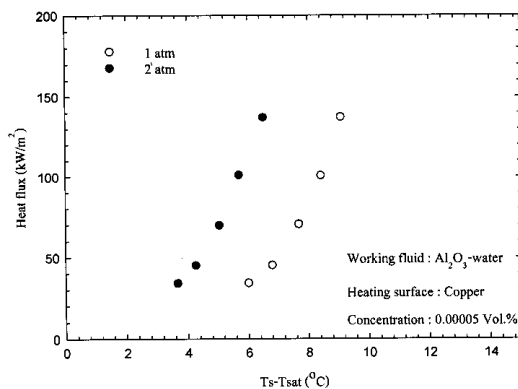


รูปที่ 5 ค่าฟลักซ์ความร้อนของของไหลนาโนเมื่อเทียบกับน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ

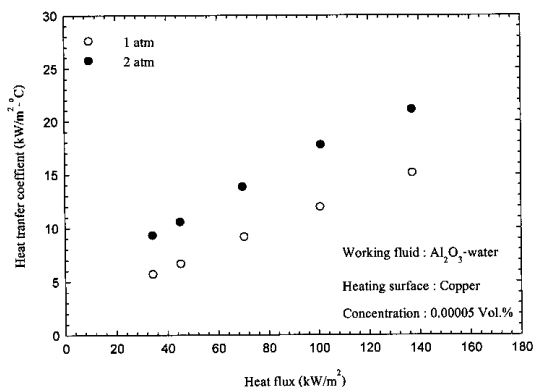


รูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนเทียบกับน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ

จากกราฟรูปที่ 5 และ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองของของไหลนาโนที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กับค่าที่ได้จากน้ำ ซึ่งจากการทดลองเห็นได้ชัดว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นเพิ่มขึ้นตามค่าของฟลักซ์ความร้อน และการใช้ของไหลนาโนนั้นไม่ได้ช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลนั้นสูงขึ้นเลย และยังมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลนาโน ทั้งนี้อาจเป็นสาเหตุเนื่องมาจากอนุภาคของนาโนนั้นอาจไปปกคลุมพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน ทำให้มีพฤติกรรมเสมือนเป็นตัวต้านทานความร้อน (Thermal resistance) ทำให้สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนลดลง



รูปที่ 7 ผลของความดันที่มีต่อค่าฟลักซ์ความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.00005 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 8 ผลของความดันที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.00005 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

รูปที่ 7 และ 8 แสดงผลของความดันที่มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโน ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.00005 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การผลการทดลองพบว่าเมื่อความดันของของไหลลดลงจะทำให้เส้นโค้งการเดือดนั้นเคลื่อนไปทางซ้ายนั้นหมายถึงค่าผลต่างระหว่างผิวให้ความร้อนกับของไหลนั้นสูงขึ้น ซึ่งทำให้ช่วงเริ่มต้นเกิดการเดือด (Onset of nucleate boiling) นั้นช้าลง ทำให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนลดลง

ซึ่งจากการวัดค่าสมบัติการถ่ายเทความร้อนของของไหลนาโนนั้น พบว่าค่าการนำความร้อนและความจุความร้อนของของไหลนาโน ให้ค่าที่แสดงถึงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าน้ำ กว่าคือค่าการนำความร้อนดีกว่า และไม่จุความร้อน แต่เมื่อนำมาใช้กับการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลนั้นพบว่าให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่าของไหลฐาน ซึ่งเป็นงานที่จะต้องศึกษาค้นคว้าในเรื่องนี้อีกมาก เพื่อที่จะยืนยันสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่แท้จริง

6. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูล ของของไหลนาโนชนิดที่อนุภาคของอลูมินาร์ลงไปในน้ำ (Al₂O₃-water nanofluids) โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.00005, 0.0001, 0.005 และ 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ และทดสอบที่ความดัน 1 และ 2 บรรยากาศ สำหรับพื้นผิวให้ความร้อนนั้นทำมาจากทองแดงมีลักษณะทรงกระบอก วางในแนวนอน ซึ่งจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ของไหลนาโนมีสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่าของไหลฐาน
2. การใช้ของไหลนาโน ไม่ได้ทำให้ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเดือดแบบฟูลนั้นสูงขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้น

3. ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนนั้นลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ นายธีรธรรม แคะนาค, นายภูมิพัฒน์ จตุรพัฒน์ภูมิ และนายประวิทย์ เกิดเพิ่มดี นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ ที่ช่วยในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Choi, S.U.S. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticle, *ASME FED*, Vol.231, 1995, pp. 99.

[2] Duangthongsuk, W. and Wongwises, S. (2007). A critical review of convective heat transfer of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, 2007, pp. 797-817.

[3] Pak, B. C. and Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, Vol. 11, 1998, pp. 151-170.

[4] Xuan, Y. and Li, Q. (2003). Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *ASME Journal Heat Transfer*, Vol. 125, 2003, pp. 151.

[5] Wen, D. and Ding, Y. (2004). Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, 2004, pp. 5181.

[6] He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D. and Lu, H. (2007). Heat transfer and flow

behavior of aqueous suspensions of TiO_2 nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, 2007, pp. 2272.

[7] Duangthongsuk, W. and Wongwises, S. (2008). Effect of thermophysical properties models on the prediction of the convective heat transfer coefficient for low concentration nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, 2008, pp. 1320.

[8] Duangthongsuk, W. and Wongwises, S. (2009). Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO_2 -water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, 2009, pp. 2059.

[9] Duangthongsuk, W. and Wongwises, S. (2010). An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO_2 -water nanofluids flowing under a turbulent flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, 2010, pp. 334-344.

[10] Das, S.K., Putra, N. and Roetzel, W. (2003). Pool boiling characteristics of nanofluids, *International Journal Heat and mass transfer*, Vol. 46, pp.851-862.

[11] You, S.M., Kim, J.H. and Kim, K.H. (2003). Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, *Applied Physics Letters*, Vol. 83, pp. 3374–3376.

[12] Li, C.H. Wang, B.X. and Peng, X.F. (2004). On the pool boiling of subcooled nano-particle suspensions, *paper presented in the 6th International Symposium on Heat Transfer*, Beijing, China, June 15-19, 2004

- [13] Vassallo, P., Kumar, R. and Amico, S.D. (2004). Pool boiling heat transfer experiments in silica–water nanofluids, *International Journal Heat and mass transfer*, Vol. 47, pp. 407-411.
- [14] Bang, I.C. and Chang, S.H. (2005). Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 -water nanofluids from a plain surface in a pool, *International Journal Heat and mass transfer*, Vol. 48, pp. 2407-2419.
- [15] Kim, H., Kim, J. and Kim, M. (2006). Experimental study on characteristics of water- TiO_2 nanofluids, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 38, pp. 61-68.
- [16] Nguyen, C.T., Galanis, N., Roy, G., Divoux, S. and Gillbert, D. (2006). Pool boiling characteristics of water- Al_2O_3 nanofluid, *paper presented in the 13th International Heat transfer conference*, Sydney, Australia
- [17] Kim, S.J., Bang, I.C., Buongiorno, J. and Hu, L.W.(2007). Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, *International Journal Heat and mass transfer*, Vol. 50, pp. 4105-4116.
- [18] Liu, Z. and Liao, L. (2008). Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling, *International Journal Heat and mass transfer*, Vol. 51, pp. 2593-2602.
- [19] Golubovic, M.N., Madhawa, H.D. Hettiarachchi, M., Worek, W.M. and Minkowycz, W.J. (2009). Nanofluids and critical heat flux, experimental and analytical study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp.1281-1288.
- [20] Trisaksri, V. and Wongwises, S. (2009). Nucleate pool boiling heat transfer of TiO_2 -R141b nanofluids, *International Journal Heat and mass transfer*, Vol. 52, pp. 1582-1588.
- [21] Suriyawong, S. and Wongwises, S. (2010). Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO_2 -water nanofluids at very low concentrations, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, pp. 992–999.
- [22] Rohsenow, W.M. (1952). A method of correlation heat transfer data for surface boiling liquids, *ASME Transaction*, Vol. 77, pp. 969