

การเพิ่มการพาความร้อนแบบธรรมชาติของน้ำโดยรอบทรงกระบอกร้อนแนวตั้ง ด้วยการใช้คลื่นเหนือเสียง

Augmentation of Natural Convection of Water around a vertically Heating Cylinder using Ultrasound

ธนกฤต มงคลกิจงาม¹ จิระชัย มิ่งบรระเจตสุข¹ วีรชัย ชัยวรพฤกษ์¹ และเจษฎาภรณ์ ปรียด้ากุล^{2,*}

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์¹

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล²

E-mail: tanakit.m@ku.th, fengjcm@ku.ac.th, fengwcc@ku.ac.th, jetsadaporn.pri@mahidol.edu*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบต่อการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแท่งทรงกระบอกแนวตั้งในน้ำกลั่นจากคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 40 80 และ 120 กิโลเฮิรตซ์ และมีกำลังเท่ากับ 60 วัตต์ โดยทำการทดสอบบนผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เท่ากับ 14,150 วัตต์ต่อตารางเมตร ภายในส่วนทดลองขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร x ยาว 20 เซนติเมตร x สูง 20 เซนติเมตร หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงถูกติดตั้งไว้ที่ผนังด้านข้างของส่วนทดลอง และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อนที่ 5 10 และ 15 เซนติเมตร เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความถี่และระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อนต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ผลการทดลองแสดงว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุดถึง 399 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์ ที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร และพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อน นอกจากนี้สมการทำนายอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงความถี่ 40-120 กิโลเฮิรตซ์ ที่มีความแม่นยำได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ด้วย ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ในอนาคต

คำสำคัญ: การถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ; การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน; คลื่นเหนือเสียง; วัตถุทรงกระบอก

Abstract

This research investigated the ultrasonic effects on natural convection of a vertical cylinder in distilled water from 40, 80, 120 kHz ultrasound, having the power of 60 w. The experiment was carried out on a constant heat flux surface at 14,150 Wm⁻² in the test section of 20 cm width x 20 cm length x 20 cm height. The ultrasonic transducer was installed on the side wall of the test section. The distances between the transducer and heating surface were

varied as 5, 10 and 15 cm to study the effect of varying ultrasonic frequencies and distances between ultrasonic transducer and heating surface on heat transfer enhancement ratio. The results show that ultrasound can increase the heat transfer enhancement ratio mostly up to 399% under the 40 kHz waves at the distance of 5 cm. The heat transfer enhancement ratio decreases with the increase of the distance.

In addition, an accurately predictive formula for the heat transfer enhancement ratio under 40–120 kHz is also proposed in this paper. Therefore, the obtained experimental results will be important information in order to develop the higher efficiency heat exchangers in the future.

Keywords: Natural convection; Heat transfer enhancement; Ultrasonic waves; Cylindrical body

1. บทนำ

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นกระบวนการสำคัญที่สามารถช่วยประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายให้กับระบบทางความร้อนได้ เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีเชิงรับ (Passive technique) ที่ไม่นำพลังงานจากภายนอกเพิ่มเข้ามาในระบบ เช่น การทำผิวขรุขระ การเพิ่มพื้นที่ผิว และการเพิ่มการไหลควง อีกวิธี คือ วิธีเชิงรุก (Active technique) ที่มีการนำพลังงานจากภายนอกเข้ามาใช้ในระบบ เช่น การฉีดพ่น การใช้สนามแม่เหล็ก และการใช้คลื่นเหนือเสียง [1] ปัจจุบันพบว่า คลื่นเหนือเสียงถูกนำมาใช้ในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้อย่างมหาศาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ [2]

1.1 คลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียง คือคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่สูงสุดที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ คลื่นเหนือเสียงสามารถจำแนกตามความถี่ได้ 3 ประเภท ประเภทแรก คือคลื่นเสียงที่มีความถี่ระหว่าง 20 ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ จะถูกเรียกว่าคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำ นิยมนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการทำความสะอาด การเชื่อม การอบแห้ง และการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ประเภทที่สอง คือ

คลื่นเหนือเสียงความถี่สูงเป็นคลื่นที่มีความถี่ระหว่าง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และประเภทสุดท้าย คือคลื่นเหนือเสียงความถี่สูงมาก เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่มากกว่า 1 เมกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป นิยมใช้สำหรับการวินิจฉัยโรค และการตรวจสอบวัสดุ [3]

1.2 ปรากฏการณ์จากคลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียงเมื่อแพร่กระจายเข้าสู่ของเหลวจะเกิด 2 ปรากฏการณ์สำคัญต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ปรากฏการณ์แรก คือสภาวะฟองอากาศเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง (Acoustic Cavitation) เมื่อคลื่นเสียงเข้าสู่ของเหลวจะทำให้เกิดความแปรปรวนของความดันภายในของเหลว เนื่องจากการอัดตัวและการขยายตัวของคลื่น เมื่อความดันในของเหลวมีค่าต่ำกว่าความดันไอเนื่องจากการขยายตัวของคลื่น จะทำให้ฟองก่อตัวขึ้นและเมื่อฟองได้รับความดันที่สูงจากการอัดตัวของคลื่น ฟองจะเกิดการแตกตัวและระเบิดอย่างรุนแรง เมื่อเกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้นบริเวณผิวของวัตถุแล้ว จะทำให้ชั้นขีดผิวความร้อนถูกรบกวนและนำไปสู่การถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นอย่างมากในคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำ [4] และอีกปรากฏการณ์จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเหนือเสียงแพร่กระจายเข้าสู่ของเหลวแล้ว จะทำให้ของเหลวได้รับพลังงานโมเมนตัมส่งผลให้ของเหลวมีความเร็วที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณใกล้ผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้นปรากฏการณ์ที่สองนี้ถูกเรียกว่า สภาวะการไหลเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง

(Acoustic Steaming) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นอย่างมากในคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่สูง [5]

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเหนือเสียง

แรกเริ่ม ในปี 1962 Larson และ London [6] พบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติได้ ต่อมา Nomura และคณะ [7] ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความถี่คลื่นเหนือเสียงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยทดลองที่ความถี่ 28 45 และ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าที่ความถี่ 28 และ 45 กิโลเฮิร์ตซ์ เกิดสภาวะโพรงอากาศเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง ในขณะที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ไม่เกิดปรากฏการณ์นี้ ส่งผลให้การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าอย่างมากเมื่อเทียบกับความถี่ที่เกิดสภาวะโพรงอากาศ อย่างไรก็ตามกำลังของคลื่นเหนือเสียงที่ใช้ในการเปรียบเทียบของแต่ละกรณีศึกษามีค่าไม่เท่ากัน Baffigi และ Bartoli [8–10] ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นเหนือเสียงระหว่าง 37 – 40 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีกำลังอยู่ในช่วง 300 – 500 วัตต์ ที่ระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อนเท่ากับ 15 – 35 มิลลิเมตร พบว่าคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 57 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อน นอกจากนี้การเพิ่มกำลังของคลื่นเหนือเสียงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบจะเพิ่มขึ้นอีกด้วย ต่อมาในปี 2012 Rahimi และคณะ [11] ทำการศึกษาลักษณะของตำแหน่งที่ติดตั้งหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ด้านข้างและด้านล่างของส่วนทดลอง รวมถึงได้มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 1.7 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่าการติดตั้งหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ตำแหน่งด้านข้างและใช้หัวกำเนิดคลื่น

เหนือเสียงเพียงตัวเดียว ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้มากที่สุดถึง 418 เปอร์เซ็นต์ ในปี 2013 Tajik และคณะ [12] ทำการทดสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงกำลังของคลื่นเหนือเสียง กำลังของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนและระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อน พบว่าการเพิ่มกำลังของคลื่นเหนือเสียงส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มกำลังของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน อีกทั้งเมื่อลดระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Baffigi และ Bartoli และต่อมาในปี 2017 Liu และคณะ [13] ทำการศึกษากการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ โดยพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุดถึง 284 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะ ใกล้ที่สุดและอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่น้อยที่สุด

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของทรงกระบอกในแนวระดับภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียง อีกทั้งข้อมูลการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความถี่ยังมีข้อมูลน้อยอยู่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงกำลังของคลื่น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของทรงกระบอกแนวตั้งภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ต่าง ๆ และจะมีการปรับระยะห่างระหว่างอุปกรณ์กำเนิดความร้อนกับหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง เพื่อทำการศึกษาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงและระยะห่างต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่อไป

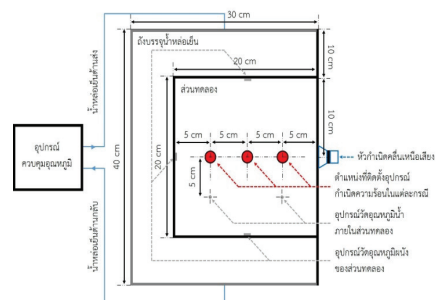
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบและติดตั้งส่วนทดลอง

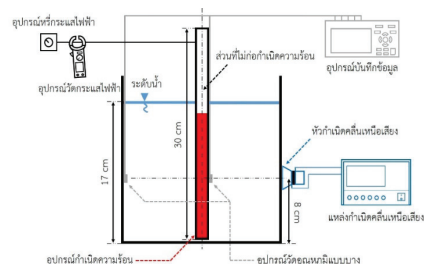
ส่วนทดลองขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร x ยาว 20 เซนติเมตร x สูง 20 เซนติเมตร ทำมาจากสแตนเลสมีความหนา 1 มิลลิเมตร ภายในบรรจุน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 9 ± 1 องศาเซลเซียส และมีระดับความสูงของน้ำคงที่เท่ากับ 0.17 เมตร ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศโดยจะมีการควบคุมอุณหภูมิผนังภายในของส่วนทดลองให้มีค่าคงที่เท่ากับ 7 ± 1 องศาเซลเซียส ด้วยการใช้น้ำหล่อเย็นจากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบบางจำนวน 5 ตัว มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ที่ ± 0.75 เปอร์เซ็นต์ เพื่อวัดอุณหภูมิน้ำกับผนังด้านในของส่วนทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 1 อุปกรณ์กำเนิดความร้อนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร มีความยาว 30 เซนติเมตร ถูกติดตั้งที่ตำแหน่งห่างจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงเป็นระยะ 5 10 และ 15 เซนติเมตร รวมถึงถูกติดตั้งห่างจากผนังส่วนทดลองด้านล่าง 5 มิลลิเมตร ทรงกระบอกร้อนนี้มีส่วนสร้างความร้อนได้ 15 เซนติเมตร และมีกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ ซึ่งเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ 14,150 วัตต์ต่อตารางเมตร กระแสไฟฟ้าที่เข้าอุปกรณ์กำเนิดความร้อนถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้า และค่ากระแสจะถูกวัดค่าโดยอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า เพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ถูกสมมติให้มีค่าคงที่เท่ากับ 220 โวลต์ ตลอดทุกกรณีในการทดลอง อุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบบาง ถูกติดตั้งที่ตำแหน่งตรงกับความสูงของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง เพื่อเก็บค่าและส่งข้อมูลผิวร้อนสู่อุปกรณ์บันทึกข้อมูล หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีความถี่เท่ากับ 40 80 และ 120 กิโลเฮิรตซ์ และมีกำลังเท่ากับ 60 วัตต์ ถูกติดตั้งที่ผนังด้านข้างของส่วนทดลองสูงจากพื้นด้านล่าง 8

เซนติเมตร หัวนี้จะถูกควบคุมโดยแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ดังแสดงในภาพที่ 2

การทดลองแต่ละกรณีจะแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกของการทดลองจะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติที่ไม่มีอิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงรบกวน เริ่มจากการเปิดอุปกรณ์กำเนิดความร้อนเพื่อสร้างสภาวะอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คงที่ และรอให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในส่วนทดลองเข้าสู่สมดุล จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิเป็นเวลา 5 นาที ที่อัตราการบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึกข้อมูล 0.5 วินาทีต่อข้อมูล และส่วนที่สองของการทดลองจะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติที่มีอิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงรบกวน โดยทำการเปิดใช้งานคลื่นเหนือเสียงต่อเนื่อง โดยควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้เหมือนกับส่วนแรก และบันทึกของอุณหภูมิต่ออีก 5 นาที ทำการทดลองซ้ำ 6 รอบในแต่ละกรณีเพื่อยืนยันความถูกต้องของการทดลอง



ภาพที่1 แผนภาพส่วนทดลองจากมุมมองด้านบน



ภาพที่2 แผนภาพส่วนทดลองจากมุมมองด้านหน้า

2.2 การประมวลผลข้อมูล

อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่, q สามารถคำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่อุปกรณ์กำเนิดความร้อนและพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน, A ดังสมการดังนี้

$$q = Q/A = iv/\pi DH \quad (1)$$

เมื่อ i และ v คือ กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ ไฟฟ้าที่เข้าสู่อุปกรณ์กำเนิดความร้อน ตามลำดับ D และ H คือ เส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, h สามารถหาได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ อุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน, T_s และอุณหภูมิน้ำในส่วนทดลอง, T_∞ ดังความสัมพันธ์นี้

$$h = q/(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการคำนวณในสมการต่าง ๆ สามารถประเมินค่าได้จากอุณหภูมิฟิล์ม, T_f ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเฉลี่ยอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนและอุณหภูมิของน้ำในส่วนทดลองตามสมการดังนี้ [14]

$$T_f = (T_s - T_\infty)/2 \quad (3)$$

เลขเรย์ลี, Ra เป็นตัวแปรที่ใช้ในการอธิบายอัตราส่วนของแรงลอยตัว แรงความหนืด และตัวเลขพริ้นด์เทิล คำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ [14]

$$Ra = g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3Pr/\nu^2 \quad (4)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งโน้มถ่วงของโลก β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน L_c คือ ความยาวสำคัญของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน Pr คือ เลขพริ้นด์เทิล และ ν คือ ความหนืดจลน์

เลขนัสเซลท์สามารถคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ความยาวสำคัญของอุปกรณ์กำเนิด

ความร้อนและสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, k ดังสมการต่อไปนี้ [14]

$$Nu = hL_c/k \quad (5)$$

เมื่อระบบมีการติดตั้งคลื่นเหนือเสียงจะมีการนิยามตัวแปรไร้หน่วยแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อมีคลื่นเหนือเสียงรบกวน, h_{us} และไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน, h_o ตัวแปรไร้หน่วยนี้ถูกเรียกว่า อัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer enhancement ratio, η)

$$\eta = (h_{us} - h_o)/h_o \quad (6)$$

2.3 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ค่าเลขนัสเซลท์ของกรณีที่ไม่มีความร้อนจะถูกลำเอียงมาเทียบกับทฤษฎีของการพาความร้อนแบบธรรมชาติของ McAdams [15] Touloukian [16] และ Churchill Chu [17]

ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์และเลขเรย์ลีของการพาความร้อนแบบธรรมชาติของทรงกระบอกแนวดิ่งตาม McAdams [15] ถูกแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$Nu = 0.53Ra^{0.25} \text{ เมื่อ } 10^4 < Ra < 10^9 \quad (7)$$

$$Nu = 0.13Ra^{0.33} \text{ เมื่อ } 10^9 < Ra < 10^{12} \quad (8)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์และเลขเรย์ลีของการพาความร้อนแบบธรรมชาติของทรงกระบอกแนวดิ่งตาม Touloukian [16] ถูกแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$Nu = 0.726Ra^{0.25} \quad (9)$$

$$\text{เมื่อ } 2 \times 10^8 < Ra < 4 \times 10^{12}$$

ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์และเลขเรย์ลีของการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นราบเรียบแนวดิ่ง จะสามารถใช้คำนวณแทนทรงกระบอกแนวดิ่งได้ตามเงื่อนไขของ Churchill Chu [17] ดังสมการต่อไปนี้

$$Nu = \{0.825 + 0.387Ra^{1/6} / [1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}\}^2 \quad (10)$$

ร้อยละของความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง เทียบกับทฤษฎีสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$\%Error = [(Nu_{exp} - Nu_{th}) / Nu_{th}] \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ Nu_{exp} คือ เลขนัสเซลท์ที่ได้จากการทดลอง และ Nu_{th} คือ เลขนัสเซลท์ที่ได้จากทฤษฎี

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซลท์จากการทดลองเทียบกับทฤษฎีของ McAdams [15] Touloukian [16] และ Churchill Chu [17] มีค่าเท่ากับ 11.0 13.0 และ -5.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมที่จะทำการทดลองเกี่ยวกับคลื่นเหนือเสียงต่อไป

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ยจากการทดลอง เมื่อไม่มีอิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงเทียบกับทฤษฎี

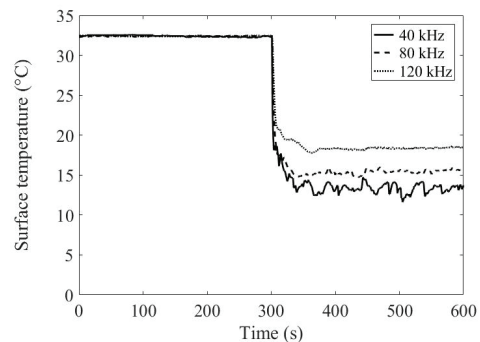
Theory	Nu	%Error
McAdams's correlation	135.8	11.0
Touloukian's correlation	133.4	13.0
Churchill Chu's correlation	158.8	- 5.1
Average experimental results without ultrasound	150.7	-

3. ผลการทดลอง

ภาพที่ 3 แสดงอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนกับเวลาที่ตำแหน่ง 5 เซนติเมตร การถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติจะถูกกำหนดให้ไม่มีการรบกวนจากคลื่นเหนือเสียงที่ระยะเวลา 5 นาทีแรก จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนมีค่าเท่ากับ 32.4 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการรบกวนด้วยคลื่นเหนือเสียงที่เวลา 300 วินาที แล้วพบว่า อุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากอิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 40 80 และ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยอุณหภูมิผิว

เฉลี่ยในแต่ละกรณีมีค่าเท่ากับ 13.7 15.6 และ 18.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

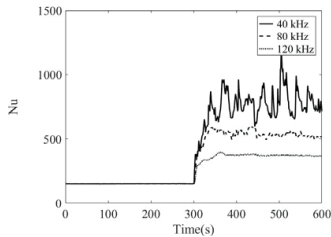
พบว่าคลื่นเหนือเสียงความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์สามารถลดอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับความถี่ 80 และ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนมีการกวัดแกว่งมากขึ้นเมื่อใช้ความถี่คลื่นมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Nomura และคณะ [7] โดยพบว่าการกวัดแกว่งของอุณหภูมิภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 40 80 และ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.57 0.27 และ 0.15 ตามลำดับ เนื่องจากคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำจะเกิดปรากฏการณ์สภาวะโพรงอากาศอย่างรุนแรง ทำให้เกิดความแปรปรวนของความดันภายในของเหลว นำมาสู่การกวัดแกว่งของอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน เมื่อใช้คลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำมากกว่าเปรียบเทียบกับความถี่สูงกว่า



ภาพที่ 3 อุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน เมื่อมีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน ที่ระยะ 5 เซนติเมตร

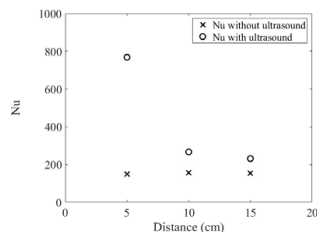
ข้อมูลอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนที่ได้นี้ ถูกนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และเลขนัสเซลท์ที่ระยะ 5 เซนติเมตร เลขนัสเซลท์เฉลี่ยที่ไม่มีอิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงรบกวนมีค่าเท่ากับ 150.7 และเมื่อแบ่งทรงกระบอกถูกรบกวนด้วยคลื่น

เหนือเสียงความถี่ 40 80 และ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ เลข
นัสเซลล์เปลี่ยนในแต่ละกรณีมีค่าเท่ากับ 768.4 520.9
และ 366.1 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4



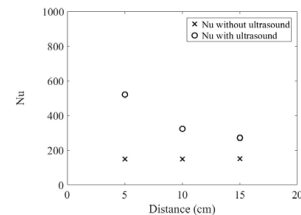
ภาพที่ 4 เลขนัสเซลล์ของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน
เมื่อมีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน
ที่ระยะ 5 เซนติเมตร

ภาพที่ 5 แสดงเลขนัสเซลล์ภายใต้อิทธิพลของ
คลื่นเหนือเสียงความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระยะห่าง 5
10 และ 15 เซนติเมตร พบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถ
เพิ่มเลขนัสเซลล์ได้สูงสุดมากถึง 768.4 ที่ระยะห่าง
5 เซนติเมตร และลดลงอย่างมากเหลือ 267.0 และ
231.1 ที่ระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ
เลขนัสเซลล์ที่ลดลงอย่างมาก เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่าง
อุปกรณ์กำเนิดความร้อนทั่วกำเนิดคลื่นเหนือเสียงนั้น
น่าจะเป็นผลเนื่องจากการสูญเสียพลังงานของคลื่น
เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งก็คือปรากฏการณ์การลด
ทอนของคลื่น (Wave attenuation) [18] นอกจากนี้
ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ยังสอดคล้องกับ Baffigi
และ Bartoli [8–10] Tajik และคณะ [12] และ Liu
และคณะ [13]



ภาพที่ 5 เลขนัสเซลล์ของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน
เมื่อมีและไม่มีคลื่นเหนือเสียง
ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ รบกวน

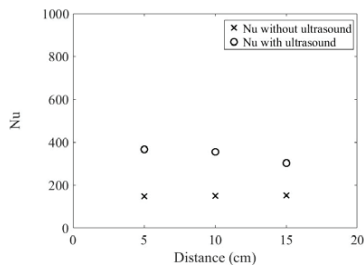
ภาพที่ 6 แสดงเลขนัสเซลล์ภายใต้อิทธิพลของ
คลื่นเหนือเสียงความถี่ 80 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระยะ 5 10
และ 15 เซนติเมตร ผลจากการทดลองพบว่าคลื่น
เหนือเสียงสามารถเพิ่มเลขนัสเซลล์ได้สูงสุดถึง 520.9
ที่ระยะ 5 เซนติเมตร และลดลงเหลือ 322.5 และ
271.5 ที่ระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ
ซึ่งสอดคล้องกับเลขนัสเซลล์ที่ได้ภายใต้คลื่นความถี่ 40
กิโลเฮิร์ตซ์ แต่อัตราการลดลงของเลขนัสเซลล์เมื่อเพิ่ม
ระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์
กำเนิดความร้อนของ 80 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่าน้อย
กว่าเมื่อเทียบกับความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 6 เลขนัสเซลล์ของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน
เมื่อมีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงความถี่
80 กิโลเฮิร์ตซ์ รบกวน

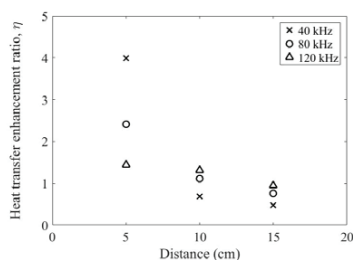
ภาพที่ 7 แสดงเลขนัสเซลล์ภายใต้อิทธิพลของ
คลื่นเหนือเสียงความถี่ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระยะ 5 10
และ 15 เซนติเมตร พบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่ม
เลขนัสเซลล์ได้สูงสุดถึง 366.2 ที่ระยะ 5 เซนติเมตร
และลดลงเหลือ 354.9 และ 302.6 ที่ระยะ 10 และ
15 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มการลดลงของ
เลขนัสเซลล์เหมือนกับความถี่ 40 และ 80 กิโลเฮิร์ตซ์
แต่อัตราการลดลงของเลขนัสเซลล์เมื่อเพิ่มระยะห่าง
ระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิด
ความร้อนน้อยสุดเมื่อเทียบกับความถี่ 40 และ 80
กิโลเฮิร์ตซ์ คาดว่าน่าจะเป็นจากอิทธิพลของมุมขยาย
ของคลื่นเหนือเสียงที่แพร่กระจายเข้าสู่ของเหลว [19]
โดยที่มุมการแพร่กระจายคลื่นนี้จะแปรผกผันกับความถี่
ของคลื่นเหนือเสียง ในคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำ มุมการ
แพร่กระจายจะมีค่ามาก ทำให้เมื่อคลื่นเหนือเสียงแพร่

กระจายเข้าสู่ของเหลวจะทำให้พื้นที่หน้าตัดมากกว่า เมื่อเทียบกับคลื่นเหนือเสียงความถี่สูง ส่งผลกำลังต่อพื้นที่หน้าตัดลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้อัตราการลดลงของเลขนัสเซลท์มากขึ้น เมื่อคลื่นมีความถี่สูงขึ้น



ภาพที่ 7 เลขนัสเซลท์ของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน เมื่อมีและไม่มีคลื่นเหนือเสียง ความถี่ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ ระบาย

ภาพที่ 8 แสดงอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ตามระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อน จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงที่สุดมากถึง 399 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้คลื่นเหนือเสียงความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระยะ 5 เซนติเมตร แต่ที่ระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร พบว่าคลื่นเหนือเสียงความถี่ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ ทำให้เกิดอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 132 และ 92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 8 อัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียง

งานวิจัยนี้ได้สร้างสมการทำนายอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดังนี้

$$\eta = e^{A+B} - 1 \quad (12)$$

$$A = 1.469 - 1.806X^4 - 5.793X^3 + 6.906X^2Y^2 \quad (13)$$

$$B = -2.116X^3Y + 0.117Y^4 + 2.226X^7 - 1.149X^6Y \quad (14)$$

$$X = \ln(x/D_i) \quad (15)$$

$$Y = \ln(f/f_o) \quad (16)$$

เมื่อ

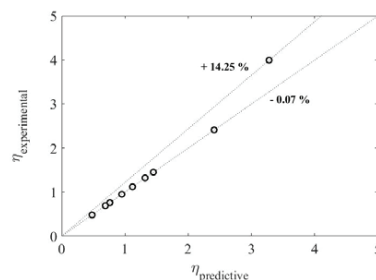
x คือ ระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อน

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง โดยหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความถี่ 40 80 และ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.50 4.06 และ 3.95 เซนติเมตร ตามลำดับ

f คือ ความถี่ของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

f_o คือ ความถี่เริ่มต้นของคลื่นเหนือเสียงมีค่าคงที่เท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์

จากสมการที่ได้พบว่าอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากสมการทำนายมีร้อยละของความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับการทดลองอยู่ในช่วงระหว่าง -0.07 ถึง +14.25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสมการที่ได้นี้จึงเป็นสมการสำคัญที่จะสามารถนำมาใช้ทำนายการเพิ่มขึ้นของการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงความถี่คลื่นเท่ากับ 40 - 120 กิโลเฮิร์ตซ์ และระยะห่าง 5 - 15 เซนติเมตร ได้ต่อไป



ภาพที่ 9 ร้อยละของอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน จากการทดลองเทียบสมการทำนายที่ได้จากงานวิจัยนี้



4. สรุปผลการศึกษา



- คลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงที่สุดมากถึง 399 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ตำแหน่ง 5 เซนติเมตร

- ที่ตำแหน่ง 10 และ 15 เซนติเมตร พบว่า คลื่นเหนือเสียงความถี่ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ เพิ่มอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดถึง 132 เปอร์เซ็นต์ และ 92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

- การเพิ่มอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ด้วยการใช้คลื่นเหนือเสียงจะลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงกับอุปกรณ์กำเนิดความร้อน

- คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ต่ำ ทำให้เกิดการกวัดแกว่งของอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนมากกว่า เมื่อเทียบกับคลื่นความถี่ที่สูงกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ



งานวิจัยครั้งนี้ได้แหล่งทุนสนับสนุนจากคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง



[1] Bergles A. E. (2001). The implications and challenges of enhanced heat transfer for the chemical process industries. Chemical Engineering Research and Design, 79: 437-444.

[2] Legay M., et al. (2011). Enhancement of heat transfer by ultrasound: review and recent advances. Int. J. Chem. Eng., 1-17.

[3] Monnot A., et al. (2007). Enhancement of cooling rate by means of high frequency ultrasound. Heat Transf. Eng., 28: 3-8

[4] Neppiras E.A. (1984). Acoustic cavitation series: part one: acoustic cavitation: an introduction. Ultrasonics, 22: 25-28.

[5] Riley N. (1998). Acoustic streaming. Theor. Comput. Fluid Dyn., 10: 349-356.

[6] Larson M.B. and London A.L. (1962). A study of the effects of ultrasonic vibrations on convection heat transfer to liquids. ASME 62-HT-44, 62-68.

[7] Nomura S., et al. (2000). Streaming induced by ultrasonic vibration in a water vessel. Japanese Journal of Applied Physics, 39: 3636-3640.

[8] Baffigi F. and Bartoli C. (2011). Effects of ultrasounds on the heat transfer enhancement from a circular cylinder to distilled water in subcooled boiling. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 3.

[9] Baffigi F. and Bartoli C. (2011). Effects of ultrasonic waves on the heat transfer enhancement in subcooled boiling. Experimental Thermal and Fluid Science, 35.

[10] Baffigi F. and Bartoli C. (2012). Influence of the ultrasounds on the heat transfer in single phase free convection and in saturated pool boiling. Experimental Thermal and Fluid Science, 36: 12-21.

[11] Rahimi M., et al. (2012). Experimental study on the effects of acoustic streaming of high frequency ultrasonic waves on convective heat transfer: Effects of transducer position and wave interference. International Communications in Heat and Mass Transfer, 39: 720-725.

[12] Tajik B., et al. (2013). Heat transfer enhancement by acoustic streaming in a closed cylindrical enclosure filled with water, International Journal of Heat and Mass Transfer, 60: 230-235.



- [13] Liu F.C., et al. (2018). Feasibility study of heat transfer enhancement by ultrasonic vibration under subcooled pool condition, *Heat Transfer Engineering*, 39: 654-662.
- [14] Cengel Y.A. and Ghajar A.J. (2015). *Heat and Mass Transfer – Fundamentals & Applications*. McGraw-Hill. New York.
- [15] McAdams W.H. (1954). *Heat Transmission*. third ed. McGraw-Hill Book Company Inc., New York.
- [16] Touloukian Y.S., et al. (1948). Heat transfer by free convection from heated vertical surfaces to liquids. *Trans. ASME*, 70: 13-18.
- [17] Churchill S.W. and Chu H.H.S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18: 1323-1329.
- [18] Knoerzer K., et al. (2011). *Innovative Food Processing Technologies: Advances in Multiphysics Simulation*. First Edition. John Wiley & Sons.
- [19] Lighthill J. (1978). Acoustic streaming. *Journal of Sound and Vibration*, 61: 391-418.