

การจำลองเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ให้เป็น ด้วยการไหลแบบฉีดผ่านลวดร้อน

Numerical Simulation of 24 kHz Ultrasonic Wave Propagation as Jet Flow past a Heated Wire

ณัฐพร เณลิวัฒนานนท์, ธีรภัทร์ ทั้งทอง และ วีรชัย ชัยวรพฤกษ์*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*E-mail: fengwcc@ku.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 0-2797-0999 #1868, เบอร์โทรสาร: 0-2579-4576

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันคลื่นเหนือเสียงถูกพบว่ามีศักยภาพสูงในการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบความร้อน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การกระจายคลื่นที่ขึ้นกับเวลาโดยตรงซึ่งจะทำให้สูญเสียทรัพยากรและระยะเวลาในการคำนวณมาก งานวิจัยนี้จึงนำเสนอเทคนิคการจำลองการกระจายคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้เป็นด้วยการไหลแบบฉีดผ่านลวดร้อนเพื่อลดเวลาในการคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FLUENT ลวดร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร ถูกวางให้ห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงเป็นระยะ 0.017 เมตร ลวดจะถูกให้ความร้อนด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เท่ากับ 70.3, 103.5, 144, 192.4 และ 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร อีกทั้งยังมีการปรับกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้มีค่าเท่ากับ 17.6, 27.9, 60 และ 120 วัตต์ ด้วยการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขถูกพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.996 คลื่นเหนือเสียงส่งผลให้ลวดมีอุณหภูมิลดลงซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนจากลวดร้อนสู่ของไหลโดยรอบมีค่าสูงขึ้นและจะมีค่าสูงขึ้นอีกเมื่อเพิ่มกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง เพราะฉะนั้นระเบียบวิธีการจำลองการกระจายคลื่นเหนือเสียงให้เป็นการไหลแบบฉีดที่ได้จากงานวิจัยนี้จะทำให้สามารถลดทรัพยากรและระยะเวลาในการคำนวณการกระจายคลื่นเหนือเสียงได้อย่างมหาศาลอีกทั้งยังมีความแม่นยำสูงรวมไปถึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานประยุกต์ด้านวิศวกรรมที่มีอยู่อย่างหลากหลายได้ต่อไป

คำหลัก: คลื่นเหนือเสียง; การเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อน; การไหลแบบฉีด; ลวดร้อน

Abstract

Nowadays, the ultrasonic wave was found to have a high potential for the heat transfer enhancement of the thermal system. However, the direct simulation of the unsteady wave propagation will cost the high computing resource and time. This research presents a simulation technique of 24 kHz ultrasonic wave distribution as a jet flow past a heated wire to decrease the computing time using a Computational Fluid Dynamic package FLUENT. A wire has a diameter of 0.25 mm, locating from the transducer at the distance of 0.017 m. It has the heat flux of 70.3, 103.5, 144,

192.4 and 249.6 kW/m². Besides, the wave power varies as 17.6, 27.9, 60 and 120 W. Using the Standard $k-\epsilon$ turbulence model, the numerical and experimental results agree well with each other's with the R^2 of 0.996. The ultrasonic wave cause the decrease of wire temperature. It consequently increases the heat transfer rate from the wire to the surrounding fluid. This rate gains more when the wave power is higher. Therefore, the modelling of ultrasonic wave propagation as the jet flow will decrease the computing resource and time enormously. Moreover, it provides an accurate prediction and is applicable for many engineering applications.

Keywords: ultrasonic waves; heat transfer enhancement; jet flow; heated wire

1. บทนำ

การถ่ายเทความร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยที่จะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทความร้อนนั้นถูกพบว่ามีผลสำคัญในชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมต่างๆอย่างมาก เช่น การปรับอากาศ รวมไปถึงการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในกระบวนการผลิตต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นถ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ จะทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางอุณหภูมิสูงไปสู่ตัวกลางอุณหภูมิต่ำได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งทำให้พลังงานที่ใช้สามารถลดลงได้ เนื่องจากในปัจจุบันคลื่นเหนือเสียงถูกพบว่ามีศักยภาพสูงในการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบความร้อน [1, 2] จึงมีการทำงานวิจัยเพื่อมุ่งเน้นที่จะเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบความร้อนโดยใช้คลื่นเหนือเสียง [2-4] โดยบางส่วนพยายามที่จะทำนายการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข [5-7] อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ขึ้นกับเวลาโดยตรงจะทำให้สูญเสียทรัพยากรและระยะเวลาในการคำนวณมาก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอเทคนิคการจำลองการไหลของน้ำและการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำและลวดร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยการสมมูลคลื่นให้เป็นการไหลแบบ

ฉีดผ่านลวดร้อนเพื่อลดเวลาในการคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FLUENT โดยระเบียบวิธีการจำลองการกระจายคลื่นเหนือเสียงให้เป็นดังการไหลแบบฉีดที่ได้จากงานวิจัยนี้จะทำให้สามารถลดทรัพยากรและระยะเวลาในการคำนวณการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงได้อย่างมหาศาล อีกทั้งยังมีความแม่นยำสูงรวมไปถึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานประยุกต์ด้านวิศวกรรมที่มีอยู่อย่างหลากหลายต่อไป

2. การตรวจเอกสาร

2.1 คลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียงเป็นคลื่นเชิงกลที่ถูกใช้ครั้งแรกเพื่อการตรวจจับเรือดำน้ำ [8] สามารถสร้างขึ้นได้โดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำมาทำทรานสดิวเซอร์เพื่อการสร้างและตรวจจับคลื่นเหนือเสียงในน้ำและอากาศ [9] คลื่นเหนือเสียงเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่เกินขีดจำกัดการรับรู้ของมนุษย์ [10] สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดตามความถี่หรือกำลัง โดยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ระหว่าง 20 – 100 กิโลเฮิร์ตซ์ จะถูกเรียกว่า คลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำหรือคลื่นเหนือเสียงกำลังสูง [11] การใช้คลื่นเหนือเสียงย่านความถี่นี้ในของไหลจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์สภาวะโพรงอากาศเนื่องจากคลื่นเสียง (Acoustic Cavitation) และสภาวะการไหลเนื่องจาก

คลื่นเสียง (Acoustic streaming) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ระดับไมโครที่มีความสำคัญอย่างมากในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน [12] ส่วนคลื่นเหนือเสียงในย่านความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ – 1 เมกะเฮิร์ตซ์ จะถูกเรียกว่า คลื่นเหนือเสียงความถี่สูงหรือคลื่นเหนือเสียงกำลังต่ำ ซึ่งนิยมใช้ในงานประยุกต์ทางด้านการแพทย์ [12] สุดท้ายนี้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่มากกว่า 1 เมกะเฮิร์ตซ์จะถูกเรียกว่า “คลื่นเหนือเสียงความถี่สูงมาก” ที่สภาวะนี้คลื่นเหนือเสียงจะไม่ส่งผลใดๆต่อตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน

สมการ Stuart Streaming เป็นสมการที่ใช้สำหรับอธิบายการไหลของของไหลเนื่องจากคลื่นเหนือเสียงที่กำลังสูง ถูกนำเสนอโดย [13] ดังนี้

$$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + F \quad (1)$$

เมื่อ

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m³

$\mathbf{v}$ คือ เวกเตอร์ของความเร็ว, m/s

P คือ ความดันสถิต, Pa

μ คือ ความหนืดจลน์, Pa.s

F คือ เวกเตอร์ของแรง, N

จากระเบียบวิธีของ [14, 15] ได้นิยามว่าการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงคล้ายกับการไหลแบบฉีด ดังนั้นจะได้

$$P = W / cA \quad (2)$$

เมื่อ

W คือ กำลังของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง, W

c คือ ความเร็วเสียง, m/s

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง, m²

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการคลื่นเสียงดังแสดงในสมการที่ 1 กับสมการ Navier-Stokes ดังแสดงในสมการที่ 3

พบว่าแต่ละพจน์ในสมการเหล่านี้มีความสอดคล้องกัน และสามารถแทนแรงเนื่องจากคลื่นเสียงได้โดยตรงในพจน์ของ F ในสมการที่ 3

$$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + F \quad (3)$$

โดยปกติแล้ว เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างลวดร้อนและน้ำจะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h สามารถคำนวณได้จาก :

$$h = q'' / (T_s - T_w) \quad (4)$$

เมื่อ

q'' คือ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่, W/m²

T_s คือ อุณหภูมิผิวของลวดร้อน, °C

T_w คือ อุณหภูมิของน้ำ, °C

เลขนัสเซลท์ซึ่งแสดงค่าความสามารถในการพาความร้อนระหว่างน้ำและลวดร้อนมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h ดังนี้:

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

เมื่อ

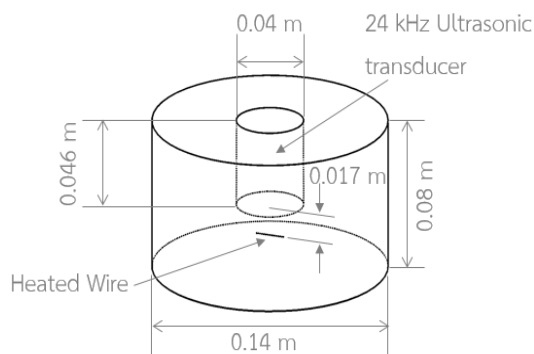
d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดร้อน, m

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, w/m.K

3. วิธีการคำนวณ

งานวิจัยนี้ทำการจำลองของการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำเชิงตัวเลขภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อศึกษาคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำ และสภาวะการไหลเนื่องจากคลื่นเสียง (Acoustic streaming) ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนตาม

การทดลองของ [5] โดยทำการจำลองการกระจายคลื่นเหนือเสียงให้เป็นดังการไหลแบบฉีดผ่านลวดร้อน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหล Fluent แบบจำลองถูกสร้างโดยการใช้โปรแกรม SolidWorks ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นภาชนะทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.14 เมตร สูง 0.08 เมตร คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ ถูกสร้างจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.04 เมตร ลวดร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ 0.017 เมตร ถูกวางให้ห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงเป็นระยะ 0.017 เมตร ตามการทดลองของ [5]



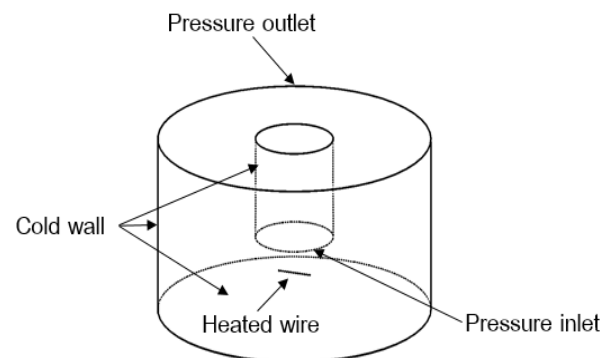
รูปที่ 1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

รูปที่ 2 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) โดยกำหนดบริเวณหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic transducer) นี้มีกำลังเท่ากับ 17.6, 27.9, 60 และ 120 วัตต์ ให้เป็นความดันด้านทางเข้า (Pressure inlet) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2 มีค่าเท่ากับ 9.5, 15, 32.26 และ 64.5 ปาสคาล และมีอุณหภูมิเท่ากับ 280 เคลวิน ที่ขอบเขตด้านบนของแบบจำลองกำหนดให้เป็นความดันด้านทางออก (Pressure outlet) มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ ที่ลวดกำหนดให้เป็นผนังร้อน (Hot wall) มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เท่ากับ 70.3, 103.5, 144, 192.4 และ 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ที่ผนังของภาชนะทรงกระบอกกำหนดให้เป็นผนังเย็น (Cold

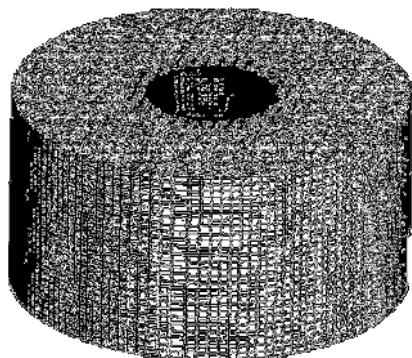
wall) มีอุณหภูมิเท่ากับ 273 เคลวิน ซึ่งเป็นเงื่อนไขค่าขอบตามการทดลองของ [5] แต่งานวิจัยของ [5] จะมีการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบที่ด้านทางเข้าเป็นความเร็วด้านทางเข้า (Velocity inlet) ซึ่งถูกพิจารณาตามสมการ

$$V = A_0 \omega \sin(\omega t) \quad (6)$$

อย่างไรก็ตามการคำนวณของ [5] ตามสมการที่ 6 นี้ จะใช้ระยะเวลาในการคำนวณสูงมากเนื่องจากการวิเคราะห์โดยตรงที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งจากการสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ที่มีการสมมูลคลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยออกมาจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง โดยตาข่ายข้อมูลที่ใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยม (Quad element) มีความหนาที่ชั้นแรกเท่ากับ 0.01 มิลลิเมตร จำนวน 12 ชั้น และมีอัตราการขยายขนาดต่อหนึ่งชั้นเท่ากับ 1.2 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3 มีการกำหนดค่า Spatial discretization ทั้งหมดให้เป็นแบบ Second order upwind ยกเว้น Gradient กำหนดให้เป็น Least squares cell based และจะมีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณไว้ที่ 10^{-5} ตลอดการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

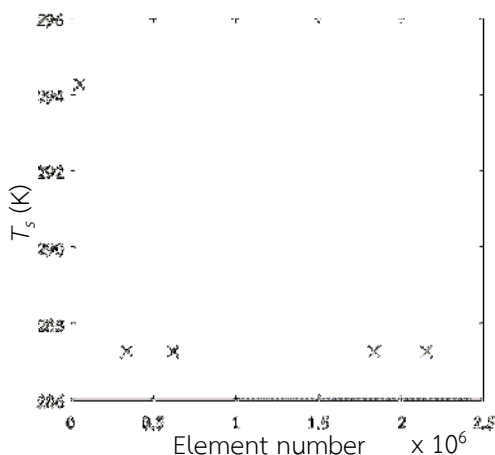


รูปที่ 2 เงื่อนไขขอบของแบบจำลอง



รูปที่ 3 ตาข่ายข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมของแบบจำลอง

วิธีการทดสอบหาค่าขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ (Mesh convergence) ทำได้โดยการกำหนดจำนวนของตาข่ายข้อมูลซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 55,090, 340,880, 620,316, 1,838,142 และ 2,156,142 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบหาค่าขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสม จากการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของลวดร้อนที่ได้จากการทดสอบนี้ พบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ลวดร้อน เริ่มคงที่เมื่อตาข่ายข้อมูลมีจำนวนเท่ากับ 340,880 เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงมีการกำหนดจำนวนของตาข่ายข้อมูลเท่ากับ 340,880 เอลิเมนต์ ตลอดงานวิจัยนี้



รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบหาค่าขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสม

4. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

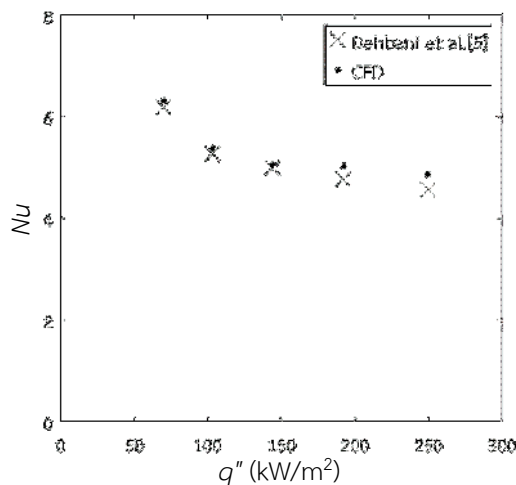
4.1 ผลการสอบเทียบความแม่นยำของการคำนวณเชิงตัวเลข

ในงานวิจัยนี้ได้มีการสอบเทียบความแม่นยำของการทำนายการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำกับลวดร้อนเชิงตัวเลขภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ แบบ 3 มิติ ตามการทดลองของ [5] มีการเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของลวดร้อนที่มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เท่ากับ 144 kW/m² ระหว่างผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้จาก [5] กับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ ซึ่งถูกคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k- ϵ , RNG, และ Realizable ดังแสดงในตารางที่ 1 จากตารางพบว่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของลวดร้อนที่ได้จากการทดลองของ [5] มีค่าเท่ากับ 290.5 เคลวิน ซึ่งมีความแตกต่างจากผลการคำนวณเชิงตัวเลขของ [5] ที่มีการคำนวณแบบขึ้นกับเวลาเท่ากับ 0.1% เมื่อนำผลที่ได้จากวิธีนี้ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ระยะเวลาในการคำนวณสูงมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยการสมมูลคลื่นเหนือเสียงให้เป็นการไหลแบบเฉียดแล้วจะพบว่าแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k- ϵ , RNG, และ Realizable มีความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ 0.28 %, 0.31 %, และ 0.28 % ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีการเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k- ϵ ตลอดงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข

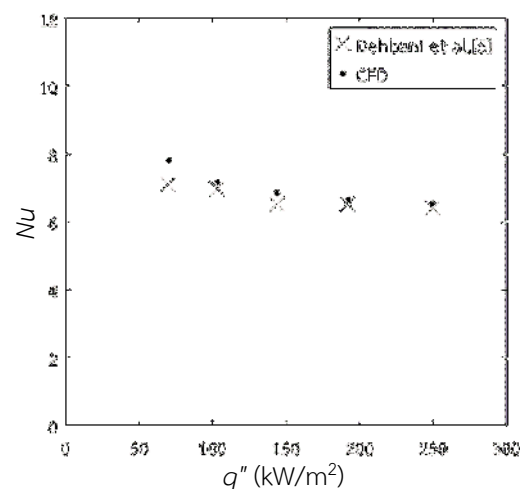
Model	T (K)	% difference
Experiment [5]	290.5	-
CFD [5]	290.2	0.1
Standard k- ϵ	289.7	0.28
RNG	289.6	0.31
Realizable	289.7	0.28

นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของลวดร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 17.6 วัตต์ ที่ได้จากการทดลองของ [5] กับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 5 โดยทำการปรับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่, q'' ของลวดร้อนให้มีค่าเท่ากับ 70.3, 103.5, 144, 192.4 และ 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร พบว่าเลขนัสเซลล์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของ [5] มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.41, 2.26, 1.57, 5.59 และ 6.77 % ในกรณีที่ลวดร้อนมีค่า q'' เท่ากับ 70.3, 103.5, 144, 192.4 และ 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาค่าความแตกต่างโดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) พบว่าในกรณีนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.997 นอกจากนี้ยังพบว่าคลื่นเหนือเสียงมีผลทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสูงขึ้นโดยเฉพาะเมื่อลวดร้อนมีค่า q'' ต่ำ แต่จะมีค่าลดลงเมื่อ q'' มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 5 แสดงการสอบเทียบค่าเลขนัสเซลล์ของลวดร้อนภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 17.6 วัตต์

นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซลล์เฉลี่ยของลวดร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 27.9 วัตต์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้กับผลที่ได้จากการทดลองของ [5] โดยทำการปรับค่า q'' ของลวดร้อนให้มีค่าเท่ากับ 70.3, 103.5, 144, 192.4 และ 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร เช่นเดียวกับกรณีที่กำลังของคลื่นเหนือเสียงเท่ากับ 17.6 วัตต์ ผลที่ได้พบว่าความแตกต่างของเลขนัสเซลล์ที่ได้จากการทดลองของ [5] และผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้มีความแตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 10.16 % ที่ q'' เท่ากับ 70.3 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6 ความแตกต่างนี้มีค่าลดลงเมื่อค่า q'' มีค่าสูงขึ้นโดยจะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1.97 % ที่ค่า q'' เท่ากับ 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร โดยจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.996 นอกจากนี้ยังพบว่าแนวโน้มของค่าเลขนัสเซลล์ยังมีค่าลดลง เมื่อค่า q'' มีค่าสูงขึ้นซึ่งตรงกับกรณีที่กำลังของคลื่นเหนือเสียงเท่ากับ 17.6 วัตต์ นั่นเอง ผลการวิเคราะห์ที่ได้เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความแม่นยำสูงพอที่จะสามารถนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมกรรมการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำโดยรอบลวดร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำได้ตลอดงานวิจัย



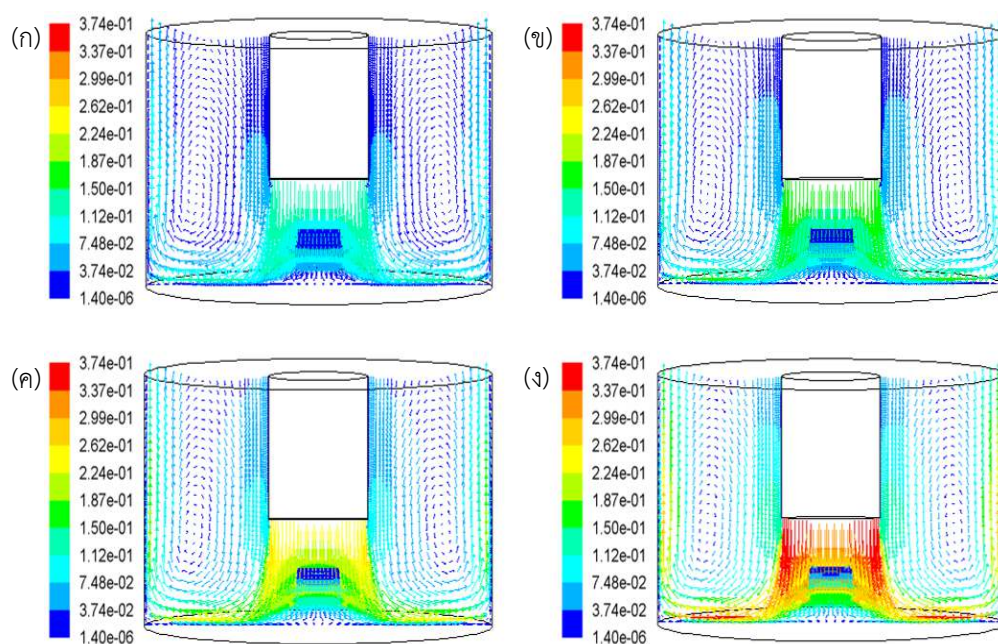
รูปที่ 6 แสดงการสอบเทียบค่าเลขนัสเซลล์ของลวดร้อนภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 27.9 วัตต์

4.2 การวิเคราะห์การเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังแตกต่างกัน

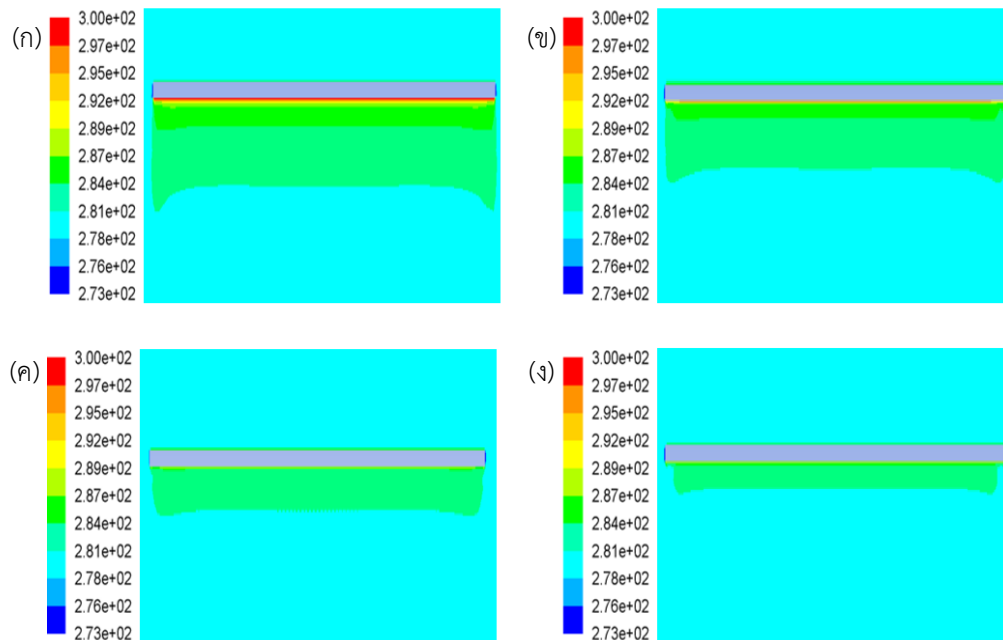
การวิเคราะห์เชิงตัวเลขในส่วนนี้จะมีการเพิ่มกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้มีค่าเท่ากับ 17.6, 27.9, 60 และ 120 วัตต์ โดยที่ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มีค่าคงที่เท่ากับ 144 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของน้ำและการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนของลวดร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังแตกต่างกัน โดยรูปที่ 7 (ก) - (ง) แสดงการกระจายความเร็วและลักษณะการไหลของน้ำเมื่อกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีค่าเท่ากับ 17.6, 27.9, 60 และ 120 วัตต์ ตามลำดับ พบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มค่าโมเมนตัมให้กับน้ำก่อให้เกิดสภาวะการไหลเนื่องจากคลื่นเหนือเสียงทำให้น้ำในระบบนี้ไหลตามทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียง ความเร็วของน้ำที่ถูกเหนี่ยวนำโดยคลื่นเหนือเสียงถูกพบว่ามีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.4×10^{-6} เมตรต่อวินาที เมื่อคลื่นเหนือเสียงมีกำลังเท่ากับ 17.6 วัตต์ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคลื่นเหนือเสียงที่ถูกนำมาใช้เหนี่ยวนำการเคลื่อนที่

ของน้ำมีกำลังเพิ่มมากขึ้น และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.374 เมตรต่อวินาที เมื่อคลื่นเหนือเสียงมีกำลังเท่ากับ 120 วัตต์

รูปที่ 8 (ก) - (ง) แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำที่บริเวณโดยรอบลวดร้อนที่มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เท่ากับ 144 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 17.6, 27.9, 60 และ 120 วัตต์ ตามลำดับ พบว่าชั้นขีดผิวความร้อนที่บริเวณด้านบนของลวดร้อนจะมีความหนาน้อยกว่าด้านล่างของลวดร้อนซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการที่น้ำที่ถูกเหนี่ยวนำโดยคลื่นเหนือเสียงไหลในทิศทางจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ที่กำลังของคลื่นเหนือเสียงต่ำคือมีค่าเท่ากับ 17.6 วัตต์ ชั้นขีดผิวความร้อนจะหนาที่สุดและมีอุณหภูมิภายในชั้นขีดผิวสูงที่สุดประมาณ 300 เคลวิน โดยความหนาของชั้นขีดผิวและอุณหภูมิของน้ำสูงสุดในชั้นขีดผิวจะมีค่าลดลงเมื่อคลื่นเหนือเสียงมีกำลังเพิ่มมากขึ้น โดยจะพบว่าชั้นขีดผิวจะบางที่สุดและอุณหภูมิสูงสุดของน้ำภายใต้ชั้นขีดผิวจะมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 287 - 289 เคลวิน เมื่อคลื่นเหนือเสียงมีกำลังเท่ากับ 120 วัตต์

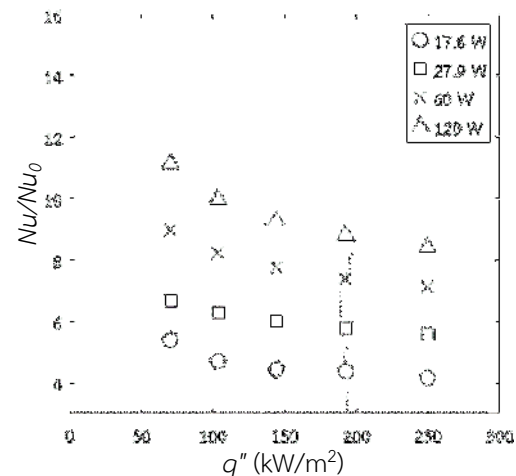


รูปที่ 7 แสดงการกระจายความเร็วของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ (ก) 17.6, (ข) 27.9, (ค) 60 และ (ง) 120 วัตต์



รูปที่ 8 แสดงการกระจายอุณหภูมิของน้ำที่บริเวณโดยรอบลวดร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ (ก) 17.6, (ข) 27.9, (ค) 60 และ (ง) 120 วัตต์

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบเลขนัสเซลล์ท์ของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำและลวดร้อนภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 17.6, 27.9, 60 และ 120 วัตต์ Nu กับ เลขนัสเซลล์ท์ในกรณีไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน, Nu_0 เมื่อลวดร้อนมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เท่ากับ 70.3, 103.5, 144, 192.4 และ 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 9 แล้ว พบว่าการอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์มีค่าสูงขึ้นเมื่อคลื่นเหนือเสียงมีกำลังเพิ่มมากขึ้นโดยเลขนัสเซลล์ท์จะเพิ่มขึ้นสูงสุด 9 – 11 เท่าเมื่อลวดร้อนมีค่า q'' อยู่ในช่วงระหว่าง 70.3 - 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ภายใต้คลื่นเหนือเสียงมีกำลังเท่ากับ 120 วัตต์ แต่อัตราส่วนนี้จะมีค่าลดลงเมื่อลวดร้อนมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูงขึ้น



รูปที่ 9 แสดงอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ท์ในกรณีหลังและก่อนการเปิดคลื่นเหนือเสียง

5. สรุปผลการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการจำลองการกระจายคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 24 กิโลเฮิรตซ์ ให้เป็นดังการไหลแบบผิวน้ำผ่านลวดร้อนมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่เลขนัสเซลล์ท์บริเวณลวดร้อนกับผลการทดลองพบที่มีความสอดคล้องกันโดยมีค่า R^2 เท่ากับ

0.996 จากผลการวิเคราะห์พบว่าคลื่นเหนือเสียงส่งผลให้ ลวดร้อนมีอุณหภูมิลดลงทำให้ความสามารถในการถ่ายเท ความร้อนจากลวดร้อนสู่ของไหลโดยรอบมีค่าสูงขึ้นและ จะมีค่าสูงขึ้นอีกเมื่อเพิ่มกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือ เสียง โดยเลขนัสเซลล์ท์จะเพิ่มขึ้นสูงสุด 9 – 11 เท่า เมื่อ ลวดร้อนมีค่า q'' อยู่ในช่วงระหว่าง 70.3 - 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ดังนั้นแบบจำลองเชิงตัวเลขของ การไหลของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงนี้ สามารถถูกนำไปใช้ในการทำนายสภาวะการไหลเนื่องจาก คลื่นเหนือเสียงได้ โดยจะสามารถลดเวลาการคำนวณได้ อย่างมหาศาล อีกทั้งยังมีความแม่นยำสูงทำให้นำไปสู่ ความรู้ความเข้าใจเรื่องการไหลและการแลกเปลี่ยนความ ร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงเพื่อนำไป ประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมที่มีอยู่อย่างหลากหลายได้ ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับเงินทุนสนับสนุน โครงการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Wong, S.W. and Chon, W.Y. (1969). Effects of ultrasonic vibrations on heat transfer to liquids by natural convection and by boiling, *AIChE Journal*, vol.15, pp. 281 – 288.

[2] Behnaz, T., Abbas, A., Majid, S.A. and Hadi, M.A. (2013). Heat transfer enhancement by acoustic streaming in a closed cylindrical enclosure filled with water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 60, May 2013, pp. 230 – 235.

[3] Yao, Y., Zhang, X. and Guo, Y. (2010). Experimental Study on Heat Transfer Enhancement of Water-water Shell-and-Tube

Heat Exchanger Assisted by Power Ultrasonic, *The 13th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, West Lafayette, Indiana.

[4] Masoud, R., Maryam, D. and Mahdih, A. (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*, vol. 39, March 2012, pp. 720 – 725.

[5] Maryam, D., Masoud, R., Mahdih, A., Abbas, M., Parisa, G.A., Ali, R.D. and Ammar, A.A. (2014). CFD modeling of convection heat transfer using 1.7 MHz and 24 kHz ultrasonic waves: a comparative study, *Heat Mass Transfer*, vol. 50, March 2014, pp. 1319 – 1333.

[6] Kim, H.J. and Jeong, J.H. (2006). Numerical analysis of experimental observations for heat transfer augmentation by ultrasonic vibration, *Heat Transfer Engineering*, vol. 27, pp. 14 – 22.

[7] Stevens, V.O., Roy, J.C., Yannick, B., Emmanuel, P., Laurent, G. and David, R. (2013). Determination of the heat transfer coefficients for the combined natural and streaming convection on an ultrasonic transducer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 62, pp. 402 – 410.

[8] Mason, W.P. (1964). *Physical Acoustics Principles and Methods*, 1st edition, Academic Press, New York.

[9] Jacques, C. and Pierre, C. (1880). Development via compression of electric polarization in hemihedral crystals with inclined

faces, *Bulletin de la Societe de Minerologique de France*, vol. 3, pp. 90 - 93.

[10] David, J. and Cheeke, N. (2002). *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*, 2nd edition, ISBN: 978-1-439-85494-5, Taylor & Francis, Philadelphia.

[11] Mason, T.J. and Lorimer, J.P. (1988). *Sonochemistry: Theory Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry*, John Wiley & Sons, New York.

[12] Laborde, J.L., Bouyer, C., Caltagirone, J.P. and Gerard, A. (1998). Acoustic cavitation field prediction at low and high frequency ultrasounds, *Ultrasonics*, vol. 36, pp. 581 – 587.

[13] Stuart, J.T. (1963). *Unsteady boundary layers. Laminar Boundary Layers*, L. Rosenhead, Oxford University Press, London.

[14] Squire, H.B. (1951). The round laminar jet, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, vol. 4, pp. 321 – 329.

[15] Lighthill, S.J. (1978). Acoustic streaming, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 61, no. 3, pp. 391 - 418.