



การศึกษาค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลของน้ำแบบปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ถูกเหนี่ยวนำโดยภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ต่ำ

Experimental Studies on Friction Factor of Turbulent Water Flow in Rectangular Tube Induced by Low Frequency Ultrasonic Waves

ก่อพงษ์ วิริยะนานนท์ และ วีรชัย ชัยวรพุกษ์*

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

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลของน้ำในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,000, 12,500, 15,000, 17,500, 20,000, 22,500, และ 25,000 โดยการใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ต่ำเท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจะถูกติดตั้งที่ด้านบนของผิวท่อที่ระยะ 0.35 เมตรจากปลายท่อด้านทางเข้าเพื่อสร้างคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 60 วัตต์ ให้เคลื่อนที่ลงในทิศทางตั้งฉากกับการไหลหลัก ภายใต้สภาวะทดลองเหล่านี้ความดันสถิตของน้ำภายในท่อจะถูกวัดที่ตำแหน่ง 0.2 และ 1.55 เมตรจากด้านทางเข้าเพื่อหาตัวประกอบความเสียดทาน จากผลการทดลองพบว่าคลื่นเหนือเสียงมีผลทำให้ค่าความดันสูญเสียและค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น 1.0021 ถึง 1.0198 เท่าและ 1.0027 ถึง 1.0191 เท่าตามลำดับ โดยจะมีค่าสูงเมื่อการไหลของน้ำมีเลขเรย์โนลด์ต่ำและจะมีค่าลดลงเมื่อการไหลมีเลขเรย์โนลด์ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าความดันสูญเสียและค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อการไหลถูกรบกวนด้วยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ และจะลดลงเมื่อคลื่นมีความถี่เท่ากับ 33 และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่นำไปสู่การออกแบบระบบทางความร้อนหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มีค่าสูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

คำหลัก: คลื่นเหนือเสียง, ท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า, ตัวประกอบความเสียดทาน, ความดันสูญเสีย, การไหลแบบปั่นป่วน

Abstract

This research investigates the change of friction factor of water flow in a rectangular tube at the Reynolds number of 10,000, 12,500, 15,000, 17,500, 20,000, 22,500, and 25,000 induced by low frequency ultrasonic waves of 25, 33, and 40 kHz. A transducer was installed on the upper surface of the tube at the distance of 0.35 m from the entrance. It produces the ultrasound of 60 watts in downward direction, perpendicular to the mainstream flow. Under these conditions, the static pressure of water was measured at the streamwise distance of 0.2 and 1.55 m from the entrance. The results show that the ultrasound causes the increase of the pressure difference and the friction factor of 1.0021 – 1.0198 times and 1.0027 – 1.0191 times, respectively. They are relatively higher at the low



Reynolds number and become relatively lower at the high Reynolds number. Besides, it is also found that the pressure loss and the friction factor are highest when the water flow is disturbed by the ultrasonic waves of 25 kHz. The value of these parameters decreases when the wave frequency are 33 and 40 kHz. Therefore, the obtained results will be an important information, leading to the better design of thermal systems or heat exchangers using ultrasonic waves in the future.

Keywords: Ultrasonic waves, Rectangular tube, Friction factor, Pressure drop, Turbulent flow

1. บทนำ

การพัฒนาประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน ถูกพบว่าเป็นหัวข้อทางวิศวกรรมที่มีความสำคัญต่อกระบวนการต่างๆในทุกอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นการปรับอากาศ รวมไปถึงการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในกระบวนการผลิต เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ต่างมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศไทยถูกพบว่าเป็นมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ และมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากขึ้นในปัจจุบัน ดังนั้นถ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารสื่อความร้อนและเย็นได้ จะทำให้ระบบความร้อนโดยรวมมีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป ซึ่งวิธีการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นสามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในวิธีเหล่านั้นคือการใช้คลื่นเหนือเสียงแพร่เข้าไปในการไหลหลักของน้ำเพื่อทำลายชั้นขีตผิวและเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนนั่นเอง [1] อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าเสียดายว่าข้อมูลของความดันสูญเสียของการไหลของของเหลวในท่อหลังการใส่คลื่นเหนือเสียงนั้นมีน้อยมากจากการตรวจสอบเอกสาร

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทดลองและศึกษาค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลของน้ำในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำ โดยผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่นำไปสู่การสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงเพื่อเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนและมีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

2. การตรวจเอกสาร

2.1 คลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic waves) คือคลื่นเสียงที่มีช่วงความถี่มากกว่า 16 ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งสูงเกินกว่าที่มนุษย์จะสามารถรับรู้ได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น การใช้คลื่นความดันจากคลื่นเหนือเสียงในการทำความสะอาดคราบสกปรกหรือคราบตะกรัน [2], การเชื่อมวัสดุต่างๆ เช่น วัสดุผสมหรือพลาสติก [3], การเร่งปฏิกิริยาเคมี [4], และการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน [5] เป็นต้น โดยปกติแล้วจะมีการจำแนกประเภทของคลื่นเหนือเสียงตามความถี่และกำลังของคลื่นเหนือเสียง โดยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ระหว่าง 20 ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ จะถูกกำหนดให้เป็นคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำหรือคลื่นเหนือเสียงกำลังสูง [6] และคลื่นเหนือเสียงจะถูกกำหนดเป็นคลื่นเหนือเสียงความถี่สูงหรือคลื่นเหนือเสียงกำลังต่ำ ถ้าคลื่นมีความถี่มากกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อปล่อยคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำแพร่เข้าสู่ตัวกลางที่เป็นของเหลวแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์สำคัญ 3 แบบคือ สภาวะการเพิ่มความร้อนเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง (Acoustic heating), สภาวะโพรงอากาศเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง (Acoustic cavitation) และสภาวะการไหลเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง (Acoustic streaming) [7]

2.1.1 สภาวะการเพิ่มความร้อนเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง

เมื่อทำการกระจายคลื่นเหนือเสียงโดยตรงสู่ตัวกลางที่เป็นของเหลวแล้วจะพบว่าพลังงานของคลื่นเหนือเสียง



จะถูกถ่ายเทโดยตรงสู่โมเลกุลของของเหลวส่งผลให้อุณหภูมิของของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

2.1.2 สภาวะการไหลเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง

สภาวะการไหลเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง คือสภาวะที่หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงทำการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานการสั่นที่มีแรงมากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักและโมเมนตัมสู่โมเลกุลของของเหลว ทำให้ของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้คล้ายกับการไหลแบบฉีด ซึ่งสามารถนำไปสู่การแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้นระหว่างของเหลวกับผิวสัมผัสนั่นเอง [8]

2.1.3 สภาวะโพรงอากาศเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง

สภาวะโพรงอากาศเนื่องจากคลื่นเหนือเสียง เกิดจากการที่ความดันของของเหลวลดลงต่ำกว่าความดันไอขณะที่คลื่นเหนือเสียงแพร่กระจายเข้าสู่ของเหลวทำให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นตามเส้นทางที่คลื่นเดินทางผ่าน เมื่อฟองอากาศดังกล่าวแตกตัว จะก่อให้เกิดแรงที่สามารถสลายชั้นขีดผิวเนื่องจากการไหลหลักได้ [9] ที่สภาวะนี้ความเร็วของการแตกตัวของฟองแก๊สถูกพบว่ามีความมากถึง 100 เมตรต่อวินาทีขึ้นกับความถี่ของคลื่นเหนือเสียง [6]

2.2 การไหลของของไหลภายในท่อ

โดยปกติแล้วเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ของการไหลของของไหลภายในท่อจะสามารถคำนวณได้จาก:

$$Re = \rho V D / \mu \quad (1)$$

เมื่อ

Re คือ เลขเรย์โนลด์

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

V คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (m)

μ คือ ค่าความหนืดของของสัมบูรณ์ (kg/m.s)

จะมีการใช้เลขเรย์โนลด์ในการกำหนดสภาวะของการไหลของของไหลภายในท่อ เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อยกว่า 2,300 การไหลจะถูกกำหนดให้เป็นการไหลแบบราบเรียบ การไหลจะเป็นแบบปั่นป่วนเมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่ามากกว่า 10,000 ระหว่าง 2,300 ถึง 10,000 การไหลจะเป็นแบบเปลี่ยนแปลง ค่าตัวประกอบความเสียดทาน, f ของการไหลในท่อซึ่งเป็นค่าแสดงความสูญเสียเนื่องจากการไหลของของไหลจากความสัมพันธ์ของ [10] ภายใต้การไหลที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ ระหว่าง 3,000 ถึง 5,000,000 สามารถคำนวณได้จาก

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^2 \quad (2)$$

ซึ่งค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลในท่อจะมีความสัมพันธ์กับค่าความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลในท่อ, ΔP ดังนี้

$$\Delta P = f L \rho V^2 / 2D \quad (3)$$

เมื่อ

L คือ ระยะห่างของตำแหน่งวัดความดันสถิต (m)

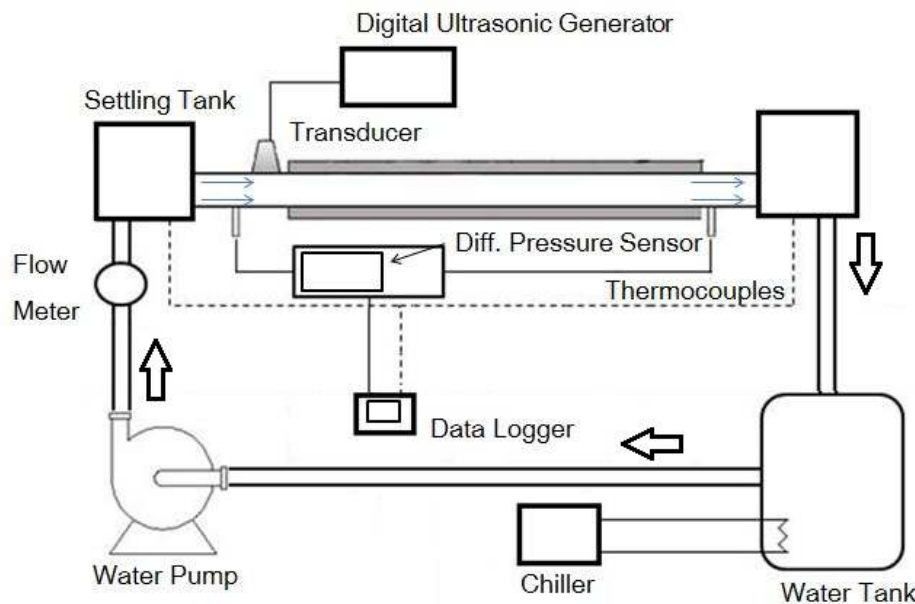
3. การทดลอง

ในการทดลองนี้มีการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองดังแสดงในรูปที่ 1 การทดลองนี้ใช้ปั๊มน้ำที่มีกำลังเท่ากับ 1.65 กิโลวัตต์เพื่อสูบน้ำจากถังเก็บน้ำขนาด 50 ลิตรเข้าสู่ส่วนทดลองโดยที่ความเร็วของน้ำนั้นสามารถกำหนดได้โดยการควบคุมผ่านอุปกรณ์ปรับความถี่มอเตอร์ (Motor inverter) โดยทำการวัดอัตราการไหลของน้ำจากอุปกรณ์วัดการไหลแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า Siemens รุ่น Sitrans FM MAG500 ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดไม่เกิน $\pm 0.4\%$ ซึ่งติดตั้งไว้ที่ทางออกของปั๊มก่อนเข้าสู่ถังพักน้ำ (Settling tank) ภายในถังนี้จะมีการติดตั้งแผ่นกั้นเพื่อลดความปั่นป่วนของน้ำและติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำที่

ทางเข้าและออกส่วนทดลอง โดยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเหล่านี้มีค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดไม่เกิน 0.75 % ช่องทางไหลของน้ำภายในส่วนทดลองมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด เท่ากับ 0.05 เมตร x 0.13 เมตร x 1 เมตร ทำจากสแตนเลสที่มีขนาดความหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตรและมีการติดตั้งช่องวัดความดันสถิตที่ระยะ 0.2 เมตรและ 1.55 เมตร จากทางเข้าส่วนทดลอง ดังนั้นช่องวัดความดันสถิตทั้งสองช่องในส่วนทดลองนี้มีระยะห่าง L เท่ากับ 1.35 เมตร ความดันสถิตถูกวัดโดยการใช้อุปกรณ์วัดความแตกต่างความดัน (Differential pressure sensor) Siemens รุ่น Sitrans P DS III ที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.5 % สัญญาณของความแตกต่างของความดันรวมไปถึงสัญญาณอุณหภูมิที่ถูกวัดในงานวิจัยนี้จะถูกบันทึกลงในกล่องรับสัญญาณ Graphtec รุ่น GL240 อีกทั้งยังมีการหุ้มฉนวนส่วนทดลองทั้งหมดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในส่วนทดลองซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อม

นั่นเอง ระหว่างการทดลอง เนื่องจากความร้อนที่ถูกสร้างโดยปั้มน้ำได้ถ่ายเทสู่น้ำทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นตลอดการทดลอง จึงมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทำความเย็น (Water chiller) เพื่อทำความเย็นให้กับน้ำในถังเก็บน้ำและทำให้อุณหภูมิของน้ำที่ด้านทางเข้าส่วนทดลองมีค่าคงที่เท่ากับ 25 องศาเซลเซียสตลอดการทดลอง นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ผนังด้านบนของส่วนทดลองที่ระยะห่างเท่ากับ 0.35 เมตรจากทางเข้าส่วนทดลอง โดยหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงนี้ถูกควบคุมโดยการใช้แหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Digital ultrasonic generator) ที่สามารถสร้างสัญญาณที่มีความถี่อยู่ในช่วงระหว่าง 20 ถึง 40 กิโลเฮิร์ตซ์ให้กับหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงได้

ในการทดลองนี้จะทำการวัดค่าความแตกต่างของความดันสถิตของการไหลของน้ำในส่วนทดลองที่ถูกควบคุมให้มีเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,000, 12,500,



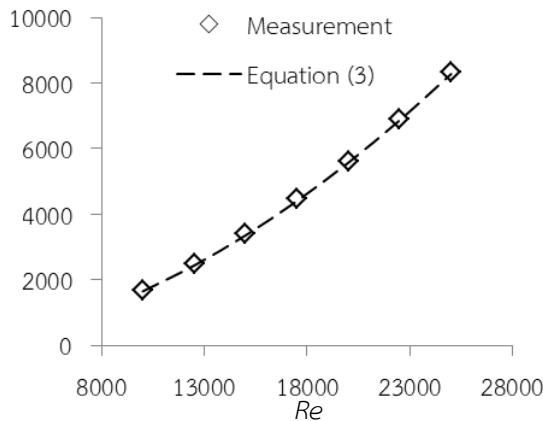
รูปที่ 1 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

15,000, 17,500, 20,000, 22,500, และ 25,000 โดยจะมีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงที่มีขนาดกำลังเท่ากับ 60 วัตต์ และมีความถี่ของคลื่นเท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของความดันสูญเสียและค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลของน้ำในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อไป

4.ผลการทดลอง

ในการทดลองหาค่าความดันสูญเสียและตัวประกอบความเสียดทานเนื่องจากการไหลของน้ำภายในท่อสี่เหลี่ยมภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำเบื้องต้นได้ทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของการติดตั้งส่วนทดลองโดยการเปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียที่วัดได้จากงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณจากสมการที่ 3 พบว่าค่าความดันสูญเสียมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดลองตั้งแต่ Re เท่ากับ 10,000 ถึง 25,000 มีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 2.4 % และ 0.4 % ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.999

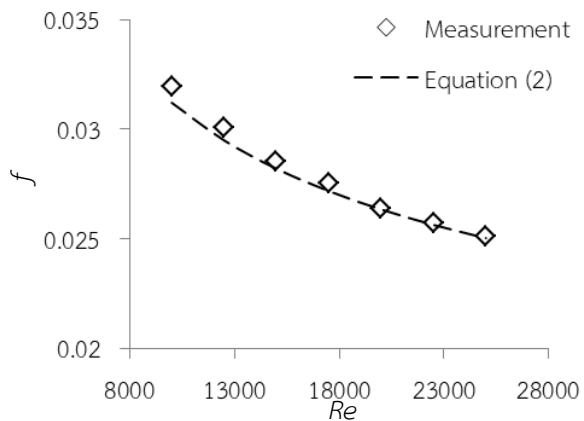


รูปที่ 2 แสดงค่าความดันสูญเสียของการไหลที่ค่า Re เท่ากับ 10,000, 12,500, 15,000, 17,500, 20,000, 22,500, และ 25,000

นอกจากนี้ยังมีการหาค่าตัวประกอบความเสียดทานโดยเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการที่ 2 พบว่าค่า f ที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าสูงกว่าผลการคำนวณจากสมการที่ 2 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 2.33 % ที่ค่า Re เท่ากับ 10,000 และจะลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงมากขึ้น มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.41 % จากข้อมูลค่าตัวประกอบความเสียดทานที่ได้จากการคำนวณและการทดลองนี้พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.999

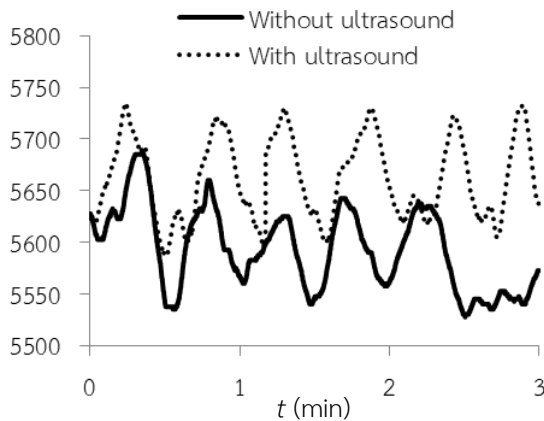
ดังนั้นจากการเปรียบเทียบค่าความดันสูญเสียดังแสดงในรูปที่ 2 และการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความเสียดทานดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าการติดตั้งการทดลองในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมที่จะใช้ทดลองศึกษาผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงที่มีต่อความดันสูญเสียและค่าตัวประกอบความเสียดทานต่อไป

ΔP (Pa)



รูปที่ 3 แสดงค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลที่ค่า Re เท่ากับ 10,000, 12,500, 15,000, 17,500, 20,000, 22,500, และ 25,000

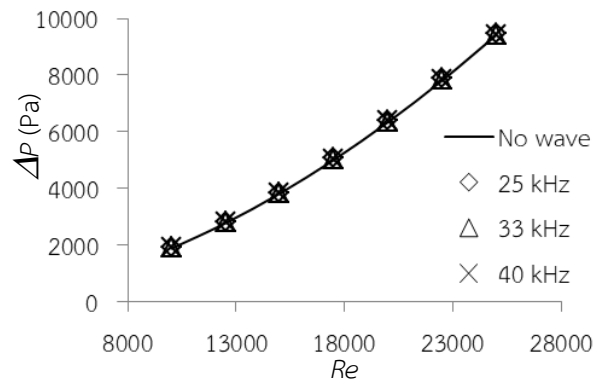
เมื่อทำการทดลองปล่อยคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำเข้าสู่น้ำเพื่อศึกษาผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงที่มีต่อความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลพบว่าคลื่นเหนือเสียงทำให้ความดันสูญเสียมีค่าเพิ่มสูงขึ้นดังในแสดงในรูปที่ 4 โดยรูปนี้แสดงตัวอย่างสัญญาณของค่าความดันสูญเสียจากการวัดจริงเป็นเวลา 3 นาทีเมื่อการไหลของน้ำมีค่า Re เท่ากับ 20,000 ก่อนและหลังการปล่อยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 33 กิโลเฮิรตซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า ΔP ของการไหลของน้ำกวัดแกว่งอยู่ในช่วง ± 70 ปาสคาล เนื่องมาจากการกวัดแกว่งของอุณหภูมิของน้ำในส่วนทดลองที่ถูกควบคุมให้อยู่ในช่วง ± 0.25 องศาเซลเซียส โดยอุปกรณ์ทำน้ำเย็น



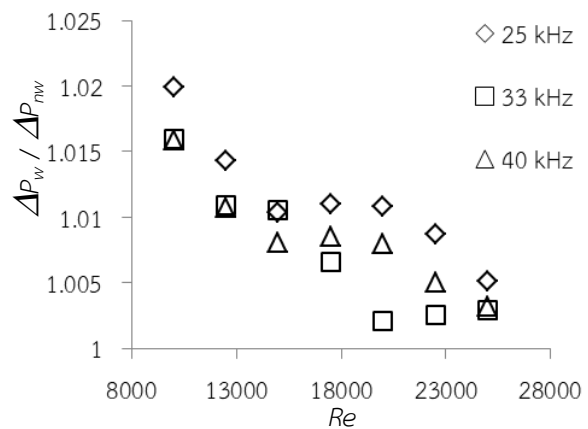
รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างสัญญาณของค่าความดันสูญเสียขณะมีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน

ค่าความดันสูญเสียของการไหลของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ได้ถูกเปรียบเทียบกับค่าก่อนการปล่อยคลื่นเหนือเสียงดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าหลังการปล่อยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่าความดันสูญเสียเฉลี่ยที่ถูกบันทึกเป็นระยะเวลา 10 นาทีจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 1,915.42, 2,813.1, 3858.03, 5063.74, 6408.68, 7877.54, และ 9462.66 ปาสคาล เมื่อการไหลมีเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,000, 12,500, 15,000, 17,500, 20,000, 22,500, และ 25,000 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 33 และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาค่าการเพิ่มขึ้นของความดันสูญเสียหลังการปล่อยคลื่นเหนือเสียง คือ $\Delta P_w / \Delta P_{nw}$ เมื่อ ΔP_{nw} คือค่าความดันสูญเสียของการไหลของน้ำก่อนการปล่อยคลื่นเหนือเสียงและ ΔP_w คือค่าความดันสูญเสียของการไหลของน้ำหลังการปล่อยคลื่นเหนือเสียง พบว่าค่า $\Delta P_w / \Delta P_{nw}$ มีค่าลดลงเมื่อการไหลมีเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 อีกทั้งยังพบว่าเมื่อทำการรบกวนการไหลของน้ำในท่อสี่เหลี่ยมด้วยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25 ถึง 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ความดันสูญเสีย

จะมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.003 ถึง 1.0198 เท่า เมื่อการไหลมีค่า Re อยู่ในช่วง 10,000 ถึง 25,000 โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ค่า Re ต่ำและลดลงเมื่อ Re มีค่าสูงมากขึ้น และยังพบอีกว่าค่า $\Delta P_w / \Delta P_{nw}$ จะมีค่ามากที่สุดเมื่อคลื่นเหนือเสียงมีความถี่เท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีค่าลดลงเมื่อคลื่นเหนือเสียงมีความถี่สูงมากขึ้น

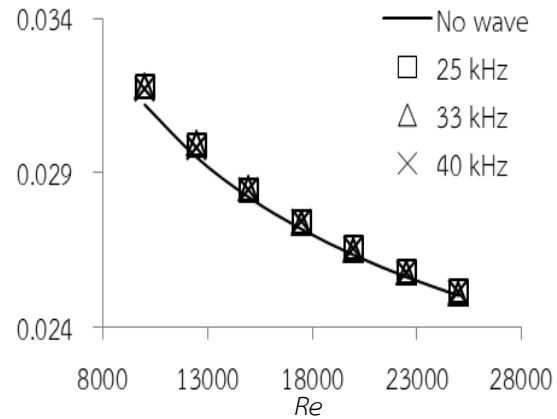


รูปที่ 5 แสดงค่าความดันสูญเสียเมื่อการไหลถูกรบกวนด้วยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์

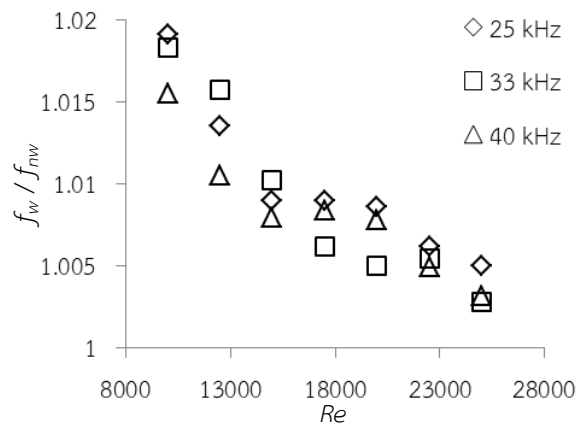


รูปที่ 6 แสดงค่า $\Delta P_w / \Delta P_{nw}$ เมื่อการไหลถูกรบกวนด้วยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์

รูปที่ 7 แสดงค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลของน้ำในท่อสี่เหลี่ยมก่อนและหลังปล่อยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ เช่นเดียวกับค่าความแตกต่างของความดัน ค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อการไหลของน้ำในท่อสี่เหลี่ยมถูกรบกวนด้วยคลื่นเหนือเสียงและมีค่ามากที่สุดเมื่อคลื่นเหนือเสียงมีความถี่เท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความถี่เหนือเสียงนี้ค่าตัวประกอบความเสียดทานถูกตรวจวัดว่ามีค่าเท่ากับ 0.0317, 0.0298, 0.0284, 0.0274, 0.0265, 0.0257, และ 0.0251 เมื่อการไหลมีเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10,000, 12,500, 15,000, 17,500, 20,000, 22,500, และ 25,000 และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลของน้ำ, f_w / f_{nw} เมื่อ f_{nw} คือค่าตัวประกอบความเสียดทานก่อนการปล่อยคลื่นเหนือเสียง ในขณะที่ f_w คือค่าตัวประกอบความเสียดทานหลังการปล่อยคลื่นเหนือเสียง ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้ค่า f_w / f_{nw} ในช่วง 1.0031 ถึง 1.0191 เมื่อการไหลมีเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 10,000 ถึง 25,000 ตามลำดับ โดยจะมีค่ามากเมื่อการไหลมีค่า Re ต่ำและจะมีค่าลดลงเมื่อการไหลมีค่า Re สูงมากขึ้น และยังพบว่าค่า f_w / f_{nw} มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.019, 1.013, 1.0089, 1.0089, 1.0085, 1.0061, และ 1.0050 ที่ Re เท่ากับ 10,000, 17,500, 20,000, 22,500, และ 25,000 ตามลำดับ เมื่อคลื่นเหนือเสียงมีความถี่เท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ในขณะที่เดียวกันค่า f_w / f_{nw} มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.0191 ที่ Re เท่ากับ 10,000 เมื่อคลื่นเหนือเสียงมีความถี่เท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 7 แสดงค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 8 แสดงค่า f_w / f_{nw} เมื่อการไหลถูกรบกวนด้วยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์

5.สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาค่าตัวประกอบความเสียดทานของการไหลของน้ำแบบปั่นป่วนในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ถูกเหนี่ยวนำโดยภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ต่ำเท่ากับ 25, 33, และ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ในช่วง Re เท่ากับ 10,000, 12,500, 15,000, 17,500, 20,000, 22,500, และ 25,000 พบว่าคลื่นเหนือเสียงมีผลทำให้ค่าความดันสูญเสียและค่าตัวประกอบความเสียดทานเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่าความถี่คลื่นเหนือเสียงเท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยค่า



ความดันสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 1.0198 เท่า คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 1.9% และค่าตัวประกอบความเสียหายมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 1.0191 เท่า คิดเป็นร้อยละเท่ากับ 1.9% เมื่อเทียบกับค่าก่อนปล่อยคลื่นเหนือเสียง โดยค่าความดันสูญเสียและค่าตัวประกอบความเสียหายจะมีค่าลดลง เมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นข้อมูลของความดันสูญเสียและค่าตัวประกอบความเสียหายที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำไปสู่การออกแบบสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงต่อไปได้ในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับเงินทุนสนับสนุนโครงการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Legay, M., Gondrexon, N., Le Person, S., Boldo, P. and Bontemps, A. (2011). Enhancement of Heat Transfer by Ultrasound: Review and Recent Advances, *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2011, pp. 1 - 17.

[2] Yusof, N.S.M., Babgi, B., Alghamdi, Y., Aksu M., Madhavan, J. and Ashokkumar, M. (2015). Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 29, 2016, pp. 568 – 576.

[3] Zhu, Z., Lee, K.Y. and Wang, X. (2012). Ultrasonic welding of dissimilar metals, AA6061 and Ti6Al4V, *The International Journal of*

Advanced Manufacturing Technology 59, 2012, pp. 569 - 574.

[4] Mason, T.J., Paniwnyk, L. and Lorimer, J.P. (1996). The uses of ultrasound in food technology, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 3(3), 1996, pp. 253 – 260.

[5] ณรัช อินทร์วร และ วีรชัย ชัยวรพฤกษ์ (2016). การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนแผ่นระนาบโดยใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ต่ำ, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30*, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

[6] Mason, T.J. and Lorimer, J.P. (1988). Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry, *Sonochemistry Theory*, Ellis Horwood, Chichester, United Kingdom.

[7] Apfel, R.E. (1984). Acoustic cavitation inception, *Ultrasonics*, vol. 22(4), 1984, pp. 167 – 173.

[8] Lighthill, S.J. (1978). Acoustic streaming, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 61(3), 1978, pp. 391 – 418.

[9] Schneider, B., Kosar A., Kuo C.J. et al. (2006). Cavitation enhanced heat transfer in microchannels, *Journal of Heat Transfer*, vol. 128(12), 2006, pp. 1293 – 1301.

[10] Petukhov, B.S. (1970). Heat transfer and friction in turbulent flow pipe flow with variable physical properties, *Academic press*. New York, United States of America, 1970.