

การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการกระจายคลื่นเหนือเสียงแบบสมมูล ในขอบเขตการไหลของน้ำ

Numerical Modelling of Equivalent Ultrasonic Wave Distribution in Water Flow Domain

ธีรภัทร์ ทังทอง, ณัฐพร เกลิมพัฒนานนท์ และ วีรชัย ชัยวรพฤษฯ*

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

งานวิจัยนี้นำเสนอระเบียบวิธีใหม่ของการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการกระจายคลื่นเหนือเสียงแบบสมมูลในขอบเขตการไหลของน้ำแบบ 3 มิติด้วยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FLUENT ขอบเขตการไหลมีลักษณะเป็นภาชนะทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.135 เมตรและมีปริมาตรเท่ากับ 2,000 มิลลิลิตร คลื่นเหนือเสียงถูกปล่อยออกมาจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.013 เมตรและมีกำลังเท่ากับ 30 วัตต์ ในงานวิจัยนี้ปริมาตรใต้หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจะถูกกำหนดให้เป็นบริเวณที่มีการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้กับของไหล มีระยะเท่ากับขนาดของระยะสนามใกล้ของแหล่งกำเนิดเสียง จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษานี้และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองเก่าที่ได้จากการตรวจสอบการรวมไปถึงผลการทดลองพบว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ถูกเสนอในงานวิจัยนี้สามารถทำนายผลการไหลของของไหลได้อย่างแม่นยำทั่วทั้งขอบเขตการไหลโดยเฉพาะในบริเวณระยะสนามใกล้ ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเหนือเสียงได้อย่างหลากหลาย เช่น การเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อน, กระบวนการอบแห้ง, รวมไปถึงงานประยุกต์ด้านการทำความสะอาดต่อไป

คำหลัก: แบบจำลองเชิงตัวเลข, ระยะสนามใกล้, การไหลของน้ำ, คลื่นเหนือเสียง

Abstract

This research presents a new numerical modelling of equivalent ultrasonic wave distribution in 3D water flow domain using Computational Fluid Dynamics program - Fluent. The domain is a cylindrical vessel, having a diameter of 0.135 m and a volume of 2,000 ml. The ultrasound was emitted from the ultrasonic transducer having a diameter of 0.013 m and the power of 30 W. In this study, the volume underneath ultrasonic transducer was specified to be a region, adding the momentum energy and turbulence to the liquid. The thickness of this region equals a near field distance of the acoustic source. From the comparison between the obtained results and those yielded from the numerical technique from the recent literatures as well as from the experiment, it's

found that the numerical model proposed in this research can predict the fluid flow accurately through the flow domain, especially in the region of the far field distance. It is applicable to the various engineering applications relating to the ultrasonic waves such as the heat transfer enhancement, the drying process, as well as the cleaning application etc.

Keywords: numerical modelling, near field distance, water flow, ultrasonic waves

1. บทนำ

หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic transducer) เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานทางกล ก่อให้เกิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic waves) กระจายสู่ตัวกลาง คลื่นเหนือเสียงเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะสามารถรับรู้ได้ คลื่นนี้มีคุณสมบัติเด่นคือสามารถเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยไม่มีการเสี้ยวเบน จึงมีการนำคลื่นเหนือเสียงมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น การเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อน, กระบวนการอบแห้ง, รวมไปถึงงานประยุกต์ด้านการทำความสะอาด เป็นต้น [1] ได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลักษณะการกระจายคลื่นเหนือเสียงจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ร่วมกับการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics – CFD) อย่างไรก็ตามการทำนายการกระจายคลื่นเชิงตัวเลขโดยตรงให้ขึ้นกับเวลาจะต้องใช้ทรัพยากรและเวลาในการคำนวณสูงมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะนำเสนอระเบียบวิธีใหม่ของการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการกระจายคลื่นเหนือเสียงแบบสมมูลในขอบเขตการไหลของน้ำแบบ 3 มิติด้วยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FLUENT โดยผลที่ได้จะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของ [2] และผลการคำนวณจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้โดยทั่วไปจากการตรวจเอกสารคือการแปลงกำลังของคลื่นเหนือเสียงให้เป็นความดันขาเข้าคั่งที่ [3, 4] ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่นำไปสู่การพัฒนาสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการกระจายคลื่นเหนือเสียงที่

สามารถทำนายผลการไหลของของไหลภายใต้คลื่นเหนือเสียงได้อย่างแม่นยำทั่วทั้งขอบเขตการไหล ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเหนือเสียงได้อย่างหลากหลายต่อไปได้ในอนาคต

2. การตรวจเอกสาร

2.1 คลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียงเป็นคลื่นเชิงกลที่มีความถี่เกินกว่าที่มนุษย์จะรับรู้ได้ โดยทั่วไปจะมีค่ามากกว่า 16 ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามความถี่ของคลื่น ได้แก่ คลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำคือคลื่นเหนือเสียงที่มีย่านความถี่อยู่ในช่วง 20 ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และคลื่นเหนือเสียงความถี่สูงคือคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่มากกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ [1] เมื่อทำการปล่อยคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำเข้าสู่ของไหลเหลวแล้ว คลื่นนี้จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์สถานะโพรงอากาศเนื่องจากคลื่นเสียง (Acoustic cavitation) และสถานะการไหลเนื่องจากคลื่นเสียง (Acoustic streaming) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ในระดับไมโครและมีผลกระทบโดยตรงต่องานประยุกต์ด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน, การทำความสะอาด, การเชื่อมพลาสติก, และการเกิดปฏิกิริยาเคมี [1] ส่วนคลื่นเหนือเสียงความถี่สูงนั้นถูกพบว่ามีค่าความถี่ที่สูงมาก จึงไม่ส่งผลกระทบใดๆต่อตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน ทำให้นิยมนำมาใช้ในงานประยุกต์ด้านการแพทย์ [5]

[2] ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงในภาชนะทรงกระบอก มีการใช้ อุปกรณ์ วัด ความ เร็ว แบบ Laser Doppler Anemometer – LDA เพื่อวัดความเร็วของน้ำที่ถูก

เหนี่ยวนำโดยคลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยจากหัวกำเนิดในทิศทางจากบนลงล่าง พบว่าความเร็วในแนวแกนตั้งของน้ำแปรผันตรงตามกำลังและแปรผกผันกับระยะจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง โดยคลื่นนี้ทำให้น้ำมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.57 เมตรต่อวินาที ที่กำลังเท่ากับ 30 วัตต์ ที่ตำแหน่ง 0.01 เมตรในแนวแกนตั้งจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง นอกจากนี้ [4] ได้ทำการศึกษาการไหลของน้ำที่ถูกเหนี่ยวนำโดยการใช้คลื่นเหนือเสียงจากงานวิจัยของ [2] ด้วยการใส่ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k - \epsilon$ พบว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถทำนายความเร็วของน้ำตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบที่มีความแตกต่างจากการทดลองจริง ทำให้การทำนายความเร็วของน้ำที่บริเวณโดยรอบหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก

2.2 สมการที่เกี่ยวข้อง

เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลแบบปั่นป่วน 3 มิติ สมการความต่อเนื่องสามารถแสดงได้ในรูปของ

$$\partial \rho / \partial t = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad (1)$$

เมื่อ

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

t คือ เวลา (s)

$\mathbf{v}$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว (m/s)

และสมการการอนุรักษ์โมเมนตัมของของไหลจะถูกแสดงโดยสมการ Navier-Stokes คือ

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

เมื่อ

P คือ ความดันสถิต (Pa)

$\mathbf{F}$ คือ เวกเตอร์ของแรง (N)

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (Pa.s)

เนื่องจาก [6] ได้นิยามว่าการเคลื่อนที่ของคลื่นเหนือเสียงในตัวกลางจากหัวกำเนิดมีลักษณะคล้ายกับการไหลแบบฉีด ดังนั้นเมื่อ [7] ได้นำเสนอหลักการ Stuart Streaming เพื่อใช้ทำนายการไหลของของไหลภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงตามสมการที่ 3 แล้ว สมการนี้จึงถูกใช้เป็นสมการหลักเพื่อใช้ในการทำนายการไหลของน้ำที่ถูกเหนี่ยวนำโดยคลื่นเหนือเสียงนั่นเอง

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

จาก [6] และ [8] จะได้

$$P = W / (cA) \quad (4)$$

เมื่อ

W คือ กำลังของคลื่นเหนือเสียง (W)

c คือ ความเร็วเสียง (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (m^2)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการเพิ่มค่าความปั่นป่วนคือค่า Turbulent kinetic energy, k และ ค่า turbulent dissipation rate, ϵ ให้กับการไหลแบบฉีดที่ถูกสมมูลมาจากการกระจายคลื่นเสียงโดยที่ค่า k สามารถคำนวณได้จาก

$$k = [(\epsilon \mu_t) / (\rho C_\mu)]^{0.5} \quad (5)$$

เมื่อ

μ_t คือ ค่าความหนืดปั่นป่วน

C_μ คือ ตัวแปรแบบจำลอง $k - \epsilon = 0.09$

และค่า $\mathcal{E}$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\mathcal{E} = (C_\mu^{0.75} k^{1.5}) / l \quad (6)$$

เมื่อ

l คือ length scale (m)

ซึ่งค่าอัตราการกระจายจำเพาะ (Specific dissipation rate), ω สามารถคำนวณได้จาก

$$\omega = (C_\mu^{-0.25})(k / l)^{0.5} \quad (7)$$

โดยที่ l ได้มาจาก

$$l = 0.07 r_H \quad (8)$$

เมื่อ r_H คือ รัศมีของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง, m และ μ_t คำนวณได้จาก

$$\mu_t = 0.0016 K^{0.5} \quad (9)$$

เมื่อ K สามารถคำนวณได้จาก

$$K = \rho W / c \quad (10)$$

[9] ได้กล่าวว่าบริเวณสนามใกล้ (Near field region) คือบริเวณที่อยู่ใกล้หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจะมีความไม่คงตัวและมีความเข้มของความปั่นป่วนเนื่องจากคลื่นเสียงสูง ต่างจากการไหลที่บริเวณสนามไกล (Far field distance) ที่มีความคงตัวของการไหลมากกว่า โดยระยะสนามใกล้, N สามารถคำนวณได้จาก

$$N = (D^2 f) / 4c \quad (11)$$

เมื่อ

N คือ ระยะสนามใกล้ (m)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (m)

f คือ ความถี่ของคลื่นเหนือเสียง (Hz)

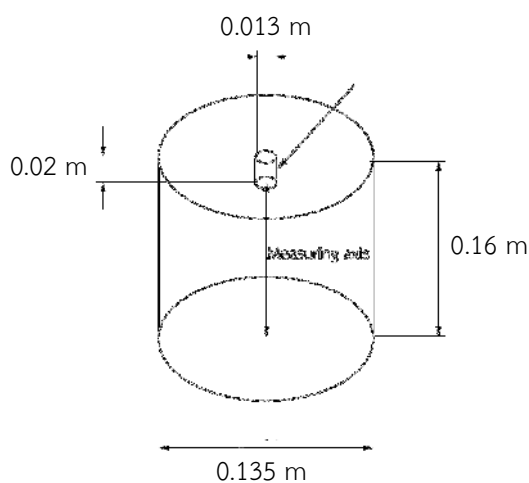
3.วิธีการคำนวณ

งานวิจัยนี้จะมีการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ANSYS FLUENT เพื่อทำนายลักษณะการไหลของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียง ซึ่งใช้ระเบียบวิธี SIMPLE เพื่อหาค่าความเร็วที่สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง และมีการกำหนดค่า Spatial discretization ทั้งหมดให้เป็นแบบ Second order upwind ยกเว้น Gradient ที่ถูกกำหนดให้เป็นแบบ Least squares cell based เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการคำนวณให้มีค่าสูงขึ้น

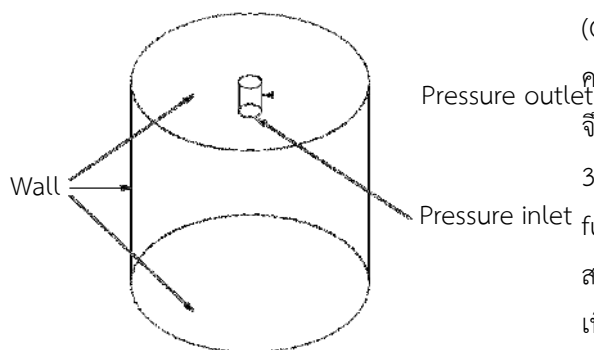
3.1 การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ

การจำลองการไหลของน้ำเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้จะมีการขอบเขตการไหลเป็นทรงกระบอก 3 มิติที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.135 เมตรและมีปริมาตรเท่ากับ 2,000 มิลลิลิตรตามการทดลองของ [2] คลื่นเหนือเสียงถูกปล่อยออกมาจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ถูกติดตั้งอยู่ด้านบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.013 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงนี้มีการกำลังเท่ากับ 30 วัตต์ ในงานวิจัยนี้จะมีวิธีการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ 2 วิธีคือ วิธีที่ 1 การสมมูลการกระจายคลื่นเหนือเสียงโดยกำหนดให้หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงปล่อยความดันคงที่ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันจากการตรวจเอกสาร [3, 4, 10] อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะทำการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบที่ทางออกเป็นความดันด้านทางออก (Pressure outlet) ทำให้การไหลมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง และวิธีที่ 2 ที่ถูกนำเสนอใหม่ในงานวิจัยนี้คือการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วน

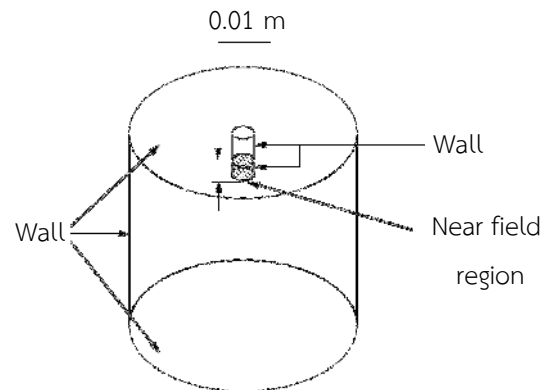
จากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้กับน้ำ ตามสมการที่ 3 โดยจะมีการกำหนดขนาดของบริเวณที่มีการถ่ายเทพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนเท่ากับระยะสนามใกล้ของแหล่งกำเนิดเสียง โดยในการงานวิจัยนี้จะมีค่า $N = 0.01$ เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 1 ขอบเขตการไหลของน้ำในภาชนะทรงกระบอก



รูปที่ 2 เงื่อนไขค่าขอบของวิธีที่กำหนดให้หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงปล่อยความดันคงที่

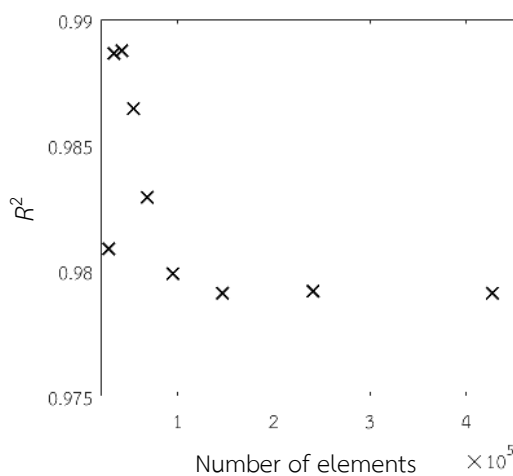


รูปที่ 3 เงื่อนไขค่าขอบของวิธีการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้กับน้ำ

งานวิจัยนี้มีการทดสอบหาขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ (Mesh convergence) โดยทำการกำหนดขนาดของตาข่ายข้อมูลให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1 – 4 มิลลิเมตรโดยเพิ่มขนาดขึ้นขึ้นละ 0.5 มิลลิเมตร จำนวนของตาข่ายข้อมูลจะขึ้นกับขนาดดังแสดงในตารางที่ 1 รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบหาค่าขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสม จากการเปรียบเทียบผลของความเร็วในแนวตั้งได้หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจากการทดลองของ [2] และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดสอบนี้โดยแสดงผลในรูปของค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) พบว่าค่า R^2 เริ่มคงที่เมื่อตาข่ายข้อมูลมีขนาดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงมีการกำหนดขนาดของตาข่ายข้อมูลให้มีขนาดเท่ากับ 3 มิลลิเมตรตลอดงานวิจัย นอกจากนี้จะมีการใช้ Wall function แบบ Scalable wall function จึงต้องมีการสร้างตาข่ายข้อมูลที่มีขนาดความสูงไม่คงที่ (Inflation) เพื่อควบคุมให้ค่า y^+ มีค่าประมาณ 1 ตลอดการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 ขนาดและจำนวนตาข่ายข้อมูล

Element size (mm)	Number of elements
2	427,265
2.5	240,704
3	146,508
3.5	94,916
4	51,252



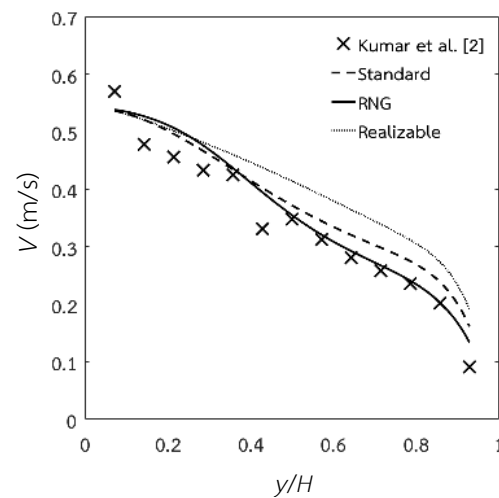
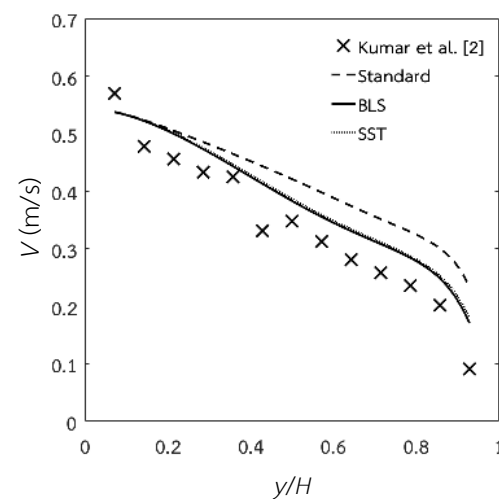
รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบหาค่าขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสม

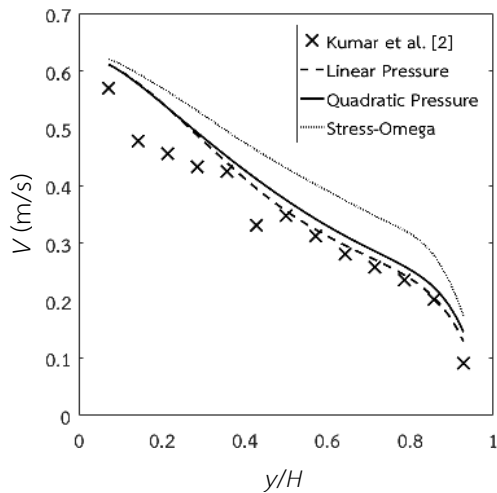
4. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

4.1 ผลการสมมูลการกระจายคลื่นเหนือเสียงโดยกำหนดให้หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงปล่อยความดันคงที่

ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบความแม่นยำของการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงแบบ 3 มิติ ซึ่งกำหนดให้หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 30 วัตต์ปล่อยความดันคงที่ โดยเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้งระหว่างผลที่ได้จากการทดลองของ [2] และผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนคือ $k-\epsilon$, $k-\omega$ และ Reynolds stress ดังแสดงในรูปที่ 5, 6, และ 7 ตามลำดับ กำหนดให้แกน x คืออัตราส่วนความ

ยาวในแนวตั้งซึ่ง $H = 0.14$ เมตร พบว่าผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากทุกแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง อีกทั้งยังพบว่าแบบจำลอง $k-\epsilon$ RNG มีความแม่นยำมากที่สุดโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9875 ดังแสดงในตารางที่ 2

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้งที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในกรณีสมมูลคลื่นเป็นความดันคงที่โดยใช้สมการ $k-\epsilon$ รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้งที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในกรณีสมมูลคลื่นเป็นความดันคงที่โดยใช้สมการ $k-\omega$



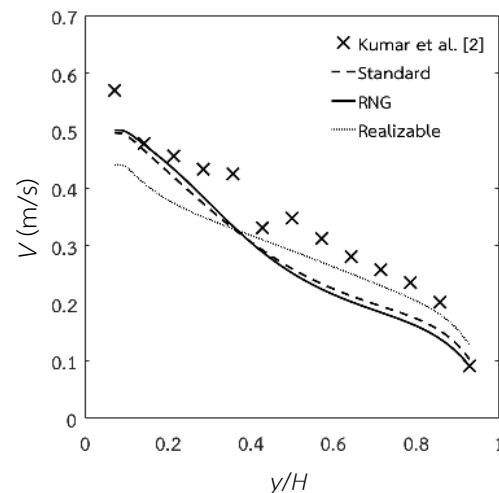
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้งที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในกรณีสมมูลคลื่นเป็นความดันคงที่โดยใช้สมการ Reynolds stress

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้งในกรณีสมมูลคลื่นเป็นความดันคงที่

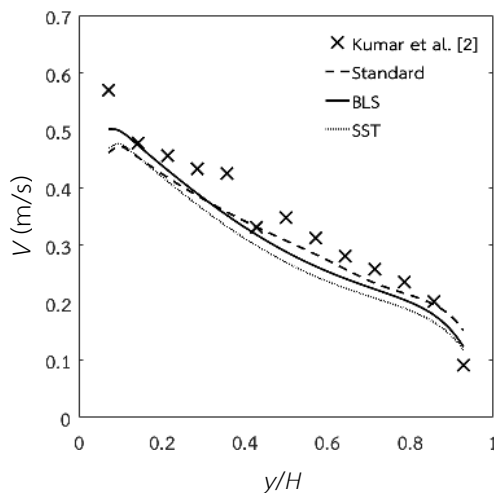
Model	Type	R^2
$k - \epsilon$	Standard	0.981
	RNG	0.988
	Realizable	0.95
$k - \omega$	Standard	0.931
	BSL	0.974
	SST	0.97
Reynolds stress	Linear pressure strain	0.978
	Quadratic pressure strain	0.972
	Stress-Omega	0.917

4.2 ผลการสมมูลการกระจายคลื่นเหนือเสียงโดยการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้กับของไหล

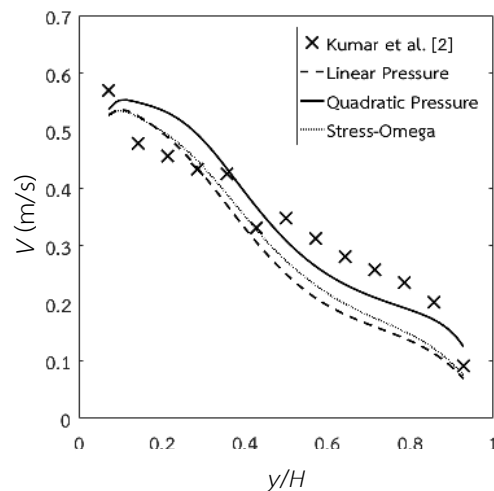
เมื่อทำการวิเคราะห์การไหลของน้ำภายใต้การกระจายคลื่นเหนือเสียงแบบสมมูลในขอบเขตการไหลของน้ำแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 30 วัตต์ให้กับของไหล เช่นเดียวกับวิธีข้างต้น จะมีการเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้งระหว่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยแบบจำลองความปั่นป่วนคือ $k - \epsilon$, $k - \omega$ และ Reynolds stress กับผลการทดลองของ [2] ดังแสดงในรูปที่ 8, 9, และ 10 ตามลำดับ พบว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองความปั่นป่วนทุกแบบจำลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองทั้งหมด โดยแบบจำลองความปั่นป่วน $k - \omega$ BLS จะมีความแม่นยำสูงที่สุดมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9833 ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 8 ความเร็วในแนวตั้งที่ได้จากวิธีการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้กับของไหลโดยใช้สมการ $k - \epsilon$



รูปที่ 9 ความเร็วในแนวดิ่งที่ได้จากวิธีการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้กับของไหลโดยใช้สมการ $k - \omega$



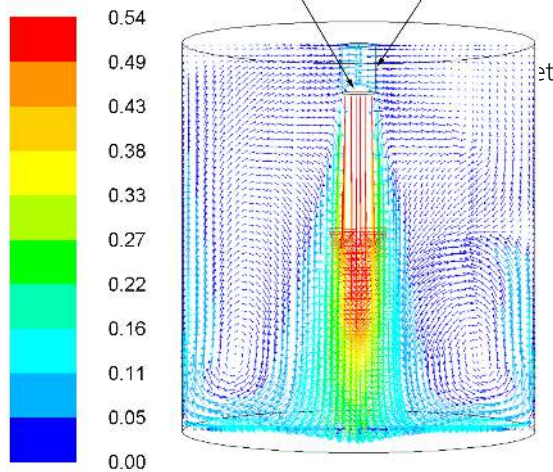
รูปที่ 10 ความเร็วในแนวดิ่งที่ได้จากวิธีการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้กับของไหลโดยใช้สมการ Reynolds stress

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความเร็วในแนวดิ่งในกรณีเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงให้กับของไหล

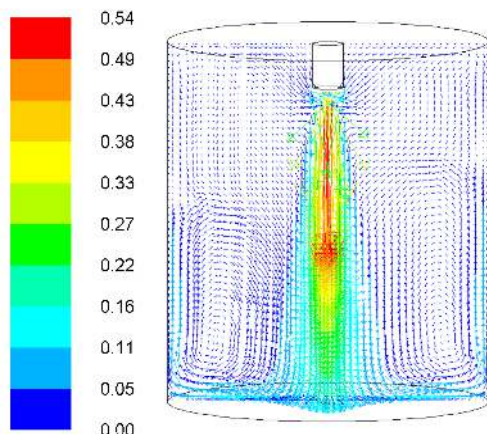
Model	Type	R ²
$k - \epsilon$	Standard	0.966
	RNG	0.962
	Realizable	0.962
$k - \omega$	Standard	0.979
	BSL	0.983
	SST	0.968
Reynolds stress	Linear pressure	0.954
	strain	
	Quadratic pressure	0.978
	strain	
	Stress-Omega	0.967

4.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีการสมมูลคลื่นเป็นความดันคงที่และวิธีสมมูลการกระจายคลื่นเหนือเสียงโดยการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนให้กับของไหล

เมื่อพิจารณาการกระจายความเร็วและลักษณะการไหลของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่ได้จากวิธีการสมมูลคลื่นเป็นความดันคงที่และวิธีสมมูลการกระจายคลื่นเหนือเสียงโดยการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนให้กับของไหลดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ พบว่าวิธีการสมมูลคลื่นทั้ง 2 วิธีมีการกระจายความเร็วและลักษณะการไหลของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงใกล้เคียงกันทั่วทั้งขอบเขตการไหล อย่างไรก็ตามการกระจายความเร็วดังแสดงในรูปที่ 11 จะมีการไหลแบบฉืดที่กว้างกว่าผลที่ได้จากรูปที่ 12 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำการสมมูลคลื่นเป็นความดันคงที่ ขอบเขตการไหลจะต้องถูกกำหนดให้มีการถ่ายเทมวลของน้ำเข้าและออกขอบเขตการไหล ซึ่งแตกต่างจากสถานะจริงที่มีน้ำไหลวนอยู่ในภาชนะทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 12

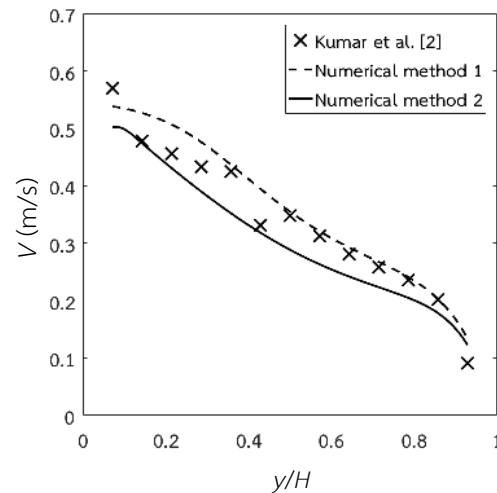


รูปที่ 11 เวกเตอร์ความเร็วจากวิธีการสมมูลคลื่นเป็น
ความดันคงที่



รูปที่ 12 เวกเตอร์ความเร็วจากวิธีสมมูลการกระจายคลื่น
เหนือเสียงโดยการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความ
ปั่นป่วนให้กับของไหล

รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้งที่ได้จากการทดลองจริงและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทั้ง 2 วิธีคือ 1 การสมมูลคลื่นเป็นความดันคงที่ และ 2 การสมมูลการกระจายคลื่นเหนือเสียงโดยการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนให้กับของไหล พบว่าวิธีที่ 2 ที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้มีความแม่นยำสูงและมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้จากวิธีที่ 1 ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยมีค่าความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 0.85 % และ 25.74 % ตามลำดับ



รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วในแนวตั้งที่ได้
จากการทดลองจริงและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทั้ง 2
วิธี

5. สรุปผลการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการกระจายความเร็วของน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ 2 วิธีคือ 1 การสมมูลคลื่นเป็นความดันคงที่ซึ่งเป็นวิธีที่มีการใช้อยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบันและวิธีที่ 2 คือการสมมูลการกระจายคลื่นเหนือเสียงโดยการเพิ่มพลังงานโมเมนตัมและความปั่นป่วนให้กับของไหลซึ่งเป็นวิธีที่ถูกนำเสนอใหม่ในงานวิจัยนี้กับผลการทดลองจริง พบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่ 1 และ 2 จะมีความแม่นยำสูงสุดด้วยการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน $k - \epsilon$ RNG และ $k - \omega$ BLS โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.988 และ 0.983 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามลักษณะการไหลที่ได้จากวิธีที่ 1 จะมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงมากเนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนมวลของของไหลระหว่างภายในและภายนอกขอบเขตการวิเคราะห์ ซึ่งต่างจากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีที่ 2 ดังนั้นแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ถูกเสนอในงานวิจัยนี้จึงมีความสามารถทำนายผลการไหลของของไหลได้อย่างแม่นยำทั่วทั้งขอบเขตการไหล ซึ่งจะสามารถ



นำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเหนือเสียงได้อย่างหลากหลาย เช่น การสร้างสภาวะการไหลเนื่องจากคลื่นเสียงเพื่อทำลายชั้นขีตผิวและก่อให้เกิดเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน, การทำความสะอาด, รวมไปถึงการผสมสารเคมีด้วยการใช้คลื่นเหนือเสียง เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) สำหรับงบประมาณสนับสนุนงานวิจัย

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] Kumar, A., Kumaresan, T., Pandit, A.B. and Joshi, J.B. (2006). Characterization of low phenomena induced by ultrasonic horn, *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 7410 - 7420.

[3] Trujillo, F.J., Knoerzer, K., Juliano, P., Roupas P. and Versteeg, C. (2009). CFD Modeling the Acoustic Field and Streaming Induced by an Ultrasonic Horn Reactor, *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO*, Melbourne, Australia.

[4] Trujillo, F.J. and Knoerzer, K. (2011). A computational modeling approach of the jet-like acoustic streaming and heat generation induced by low frequency high power ultrasonic

horn reactors, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 18(6), November 2011, pp. 1263 – 1273.

[5] Ensminger, D. and Bond L.T. (2011). *Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications*, 3rd edition, ISBN 9780824758899, Taylor & Francis, New York.

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

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

[8] Squire, H.B. (1951). The Round Laminar Jet, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, vol. 4 (3), pp. 321 - 329.

[9] Sabater, G.F., Royo, R. and Chaiworapuek, W. (2016). Experimental Investigation of Water Flow Movement Induced by Ultrasonic Waves, *The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, 13 - 16 December 2016.

[10] Dehbani, M., Rahimi, M., Abolhasani, M., Maghsoodi, A., Afshar, P.G., Dodmantipi, A.R. and Ammar, A., (2014). CFD modeling of convection heat transfer using 1.7 MHz and 24 kHz ultrasonic waves: a comparative study. *Heat and Mass Transfer*, vol. 50(9), pp. 1319 - 1333.