

การศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนในท่อ
Study of the effect of ultrasonic waves on the flow of non-Newtonian fluid
in a pipe

ณัฐกรณ พงศ์นุรักษ์ พันธุ์ธัช แป้นดวง ธีรณรินทร์ ตั้งอัศววัฒน์

กนกรัตน์ สิงห์นุ้ย¹

¹โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช, ตำบลบางจาก, อำเภอเมือง, จังหวัดนครศรีธรรมราช 80330, ประเทศไทย

Email: 6405653@pccnst.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนในท่อ โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล ความเร็วในการไหล และคุณสมบัติความหนืดเชิงผลของของไหลภายใต้อิทธิพลของคลื่นอัลตราโซนิก ของไหลที่ใช้ในการทดลองเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนชนิด shear-thinning ซึ่งมีพฤติกรรมความหนืดแปรผันตามอัตราเฉือน การทดลองดำเนินการโดยปล่อยของไหลให้ไหลผ่านท่อทรงกระบอกภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และขนาดของท่อให้คงที่ จากนั้นเปรียบเทียบอัตราการไหลของของไหลในกรณีที่มีและไม่มีผลกระทบของคลื่นอัลตราโซนิก และมีการศึกษาโดยใช้แบบจำลองของไหลแบบ Power-law model ร่วมกับการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม Computational Fluid Dynamics ผลการศึกษาพบว่าคลื่นอัลตราโซนิกสามารถช่วยให้ของไหลมีความหนืดลดลงได้จริง ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบอัตราไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนในท่อ พบว่าการทดลองที่มีคลื่นอัลตราโซนิกมีอัตราไหลที่มากกว่าการทดลองที่ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิก อย่างมีนัยสำคัญอยู่ที่ .01 ในแบบจำลองที่มีปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ต่าง ๆ เข้าไปในท่อ จะเห็นว่าความเร็วเฉลี่ยของของไหลเมื่อได้รับผลจากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่าง ๆ จะมีค่าความเร็วที่แตกต่างกันออกไป โดยเมื่อได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า จะทำให้ของไหลมีความเร็วในการไหลที่มากกว่าการได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าเล็กน้อย และอัตราเฉือนเฉลี่ยในของไหลเมื่อได้รับผลจากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่าง ๆ จะมีค่าอัตราเฉือนเฉลี่ยที่แตกต่างกันออกไป โดยเมื่อได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า จะทำให้ของไหลมีอัตราเฉือนภายในสูงกว่าในกรณีที่ได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า จึงส่งผลให้ความหนืดปรากฏในของไหลที่ได้รับผลจากคลื่นความถี่สูงกว่า มีค่าความหนืดเฉลี่ยต่ำกว่า ในกรณีที่ได้รับผลจากคลื่นความถี่ต่ำกว่า

คำสำคัญ : ของไหลนอนนิวโตเนียน, ความหนืดปรากฏ, อัตราเฉือน, คลื่นอัลตราโซนิก, อะคูสติกสตรีมมิง

บทนำ

ปัจจุบันการขนส่งของไหลผ่านท่อเป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเลียม เคมี และอาหาร อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่มักพบคือของไหลบางชนิดเป็นของไหลนอนนิวโตเนียนที่มีพฤติกรรมความหนืดไม่คงที่และมักมีความหนืดสูง (เช่น น้ำมันดิบ) เมื่อ

ของเหลวไหลผ่านท่อ ความดันที่จำเป็นในการเคลื่อนย้ายจะขึ้นอยู่กับความหนืด หากความหนืดสูงก็จะยิ่งทำให้อัตราการไหลลดลงและต้องใช้แรงดันมากขึ้น ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการขนส่ง แม้ในปัจจุบันจะมีการแก้ไขปัญหาโดยการลดค่าความหนืด ด้วยการให้ความร้อนหรือการเจือจาง แต่วิธีการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง มีความยุ่งยาก และอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของของไหลใน

ท่อได้ จากการศึกษาความก้าวหน้า ทางเทคโนโลยีคลื่นอัลตราโซนิก พบว่าสามารถนำมาใช้ กระตุ้นการไหลได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า อะคูสติกสตรีมมิ่ง ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านของไหล และทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในระดับจุลภาค ปรากฏการณ์นี้ ทำให้เกิดแรงเฉือนขนาดเล็กภายในของไหลและส่งผลให้ เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิทยากระแส (Rheology) ของของไหลนอนนิวโตเนียน คณะผู้จัดทำจึงเล็งเห็น โอกาสในการศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อการลด ความหนืดของของไหลนอนนิวโตเนียน เพื่อเป็นแนวทางใหม่ที่มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การขนส่งลดการใช้พลังงานและลดต้นทุนใน ภาคอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง

วิธีการดำเนินงาน

1) การเตรียมสารละลายและระบบท่อทดสอบ
 เตรียมของไหลทดสอบโดยนำสาร Carboxy methyl cellulose (CMC) ผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 10 กรัม ต่อลิตร เพื่อให้ได้สารละลายความเข้มข้นร้อยละ 1 (มีค่าดัชนีความข้นเหลว $K = 0.48$ ปาสคาล-วินาที และดัชนีพฤติกรรม การไหล $n = 0.40$) โดยผสมให้ได้ปริมาตรรวม 100 ลิตร จากนั้นสร้างระบบท่อทดสอบโดยใช้ท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว ความยาว 4 เมตร ต่อเข้ากับถังเก็บของเหลว และติดตั้ง บอลวาล์ว PVC ขนาด 2 นิ้วที่ปลายท่อ ติดตั้ง แหล่งกำเนิด คลื่นอัลตราโซนิกชนิด Piezo Ultrasonic transducer ขนาด 120 kHz 50 W เข้าที่ผิวท่อโดยให้ห่างจากวาล์ว 0.5 เมตร พร้อมเชื่อมต่อกับ Function generator และ Amplifier 50 W

2) การทดสอบและเปรียบเทียบอัตราการไหล
 ทำการทดสอบโดยเปิดวาล์วให้สารละลายไหลออกจากท่อเป็นเวลา 20 วินาที ลงในถังเก็บที่เตรียมไว้จากนั้นนำของไหลที่ได้ไหลลงในภาชนะทรงสี่เหลี่ยมสำหรับวัดปริมาตร (ขนาดกว้าง 55.74 ซม. ยาว 40.82 ซม.) เพื่อวัดความสูงของของไหลและคำนวณหาปริมาตรสุทธินำปริมาตรที่ได้มาคำนวณหาอัตราการไหลจากสมการ

$$Q = V/t$$

โดยที่ Q คืออัตราการไหลในหน่วย ลูกบาศก์เมตร/วินาที V คือปริมาตรในหน่วย ลูกบาศก์เมตร t คือเวลาที่ไหลในหน่วย วินาที ทำการทดสอบซ้ำเพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างกรณีที่ปล่อยให้ไหล ตามปกติและกรณีที่เปิดใช้งานคลื่นอัลตราโซนิก

3) การวิเคราะห์ความยาวขาเข้า (Entrance Length) นำค่าอัตราการไหลที่ได้จากการทดลองมา คำนวณหาความเร็วในการไหล และนำไปแทน ค่าในสมการ Generalized Reynolds Number (Lambridge, 2023,) จากนั้น นำค่าเรย์โนลด์ที่ได้ไปวิเคราะห์ในสมการ ความยาวขาเข้า (Entrance Length) เพื่อพิสูจน์ยืนยันว่าความยาวท่อ 4 เมตร ที่ใช้ในการทดลองนั้น มีระยะทางที่ยาวเพียงพอที่จะ ทำให้ของไหลเกิดสภาวะการไหลแบบ พัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) ภายในท่อ

4) การจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม CFD
 ออกแบบแบบจำลอง 2D Axisymmetric ในโปรแกรม COMSOL Multiphysics โดยกำหนดท่อรัศมี 27.5 มิลลิเมตร ยาว 4 เมตร ใช้ Pressure Acoustics Module ในการสร้างสนามคลื่นอัลตราโซนิก และใช้ Laminar Flow Module โดยตั้งค่าคุณสมบัติของไหลเป็นแบบ Power law model ตามค่าของสารละลาย CMC 10 กรัม/ลิตร ทำการตั้งค่า Mesh ให้มีขนาดไม่เกิน $\lambda/6$ และ รันการจำลองที่ระดับความถี่แตกต่างกัน ได้แก่ 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 kHz เพื่อพล็อตผลลัพธ์และ คำนวณหาค่า สนามความเร็ว อัตราเฉือน (Shear Rate) และความหนืดปรากฏ (Apparent Viscosity) ภายในของไหล

ผลและอภิปรายผล

จากการศึกษาวิจัยเรื่อง “การศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน ในท่อ” มีผลการทดสอบค่าต่าง ๆ เกี่ยวกับการไหลของของไหล ดังนี้

การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนในท่อ

1.1) ผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลาย Carboxy methyl cellulose ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร ในท่อปกติ

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าความสูงของของไหลในภาชนะวัดปริมาตรที่วัดได้และปริมาตรที่คำนวณได้ ในชุดการทดลองที่ปล่อยให้ไหลปกติ (ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิก) ในเวลา 20 วินาที (ถังวัดมีขนาดกว้าง 55.74 ± 0.05 ซม. ยาว 40.82 ± 0.05 ซม.)

ครั้งที่	ความสูงของ ของไหลใน ภาชนะ (ซม.)	ปริมาตร (ลิตร)
1	7.06 ± 0.05	16.06 ± 0.15
2	7.08 ± 0.05	16.06 ± 0.15
3	7.08 ± 0.05	16.06 ± 0.15
4	7.07 ± 0.05	16.06 ± 0.15
5	7.09 ± 0.05	16.06 ± 0.15
6	7.06 ± 0.05	16.06 ± 0.15
7	7.07 ± 0.05	16.08 ± 0.15
8	7.07 ± 0.05	16.08 ± 0.15
9	7.09 ± 0.05	16.13 ± 0.15
10	7.08 ± 0.05	16.11 ± 0.15
เฉลี่ย	7.08 ± 0.05	16.10 ± 0.15

1.2) ผลการศึกษาอัตราการไหลของของสารละลาย Carboxy methyl cellulose ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร ในท่อที่เกิดคลื่นอัลตราโซนิกในของไหล

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าความสูงของของไหลในภาชนะวัดปริมาตรที่วัดได้และปริมาตรที่คำนวณได้ ในชุดการทดลองที่มีคลื่นเสียงในของไหล ในเวลา 20 วินาที (ถังวัดมีขนาดกว้าง 55.74 ± 0.05 ซม. ยาว 40.82 ± 0.05 ซม.)

ครั้งที่	ความสูงของ ของไหลใน ภาชนะ (ซม.)	ปริมาตร (ลิตร)
1	7.53 ± 0.05	17.14 ± 0.15
2	7.56 ± 0.05	17.20 ± 0.15
3	7.54 ± 0.05	17.16 ± 0.15
4	7.58 ± 0.05	17.25 ± 0.15
5	7.55 ± 0.05	17.18 ± 0.15
6	7.57 ± 0.05	17.23 ± 0.15
7	7.52 ± 0.05	17.11 ± 0.15
8	7.59 ± 0.05	17.27 ± 0.15
9	7.55 ± 0.05	17.18 ± 0.15
10	7.54 ± 0.05	17.16 ± 0.15
เฉลี่ย	7.56 ± 0.05	17.19 ± 0.15

จากตารางที่ 1 แสดงค่าความสูงของของไหลในภาชนะวัดปริมาตรที่วัดได้และปริมาตรที่คำนวณได้ ในชุดการทดลองที่ปล่อยให้ไหลปกติ มีความสูงของของไหลในภาชนะเฉลี่ย 7.08 ± 0.05 ซม. และปริมาตรเฉลี่ย 16.10 ± 0.15 ลิตร และตารางที่ 2 แสดงค่าความสูงของของไหลในภาชนะวัดปริมาตรที่วัดได้และปริมาตรที่คำนวณได้ แสดงความสูงของของไหลในภาชนะเฉลี่ย 7.56 ± 0.05 ซม. และปริมาตรเฉลี่ย 17.19 ± 0.15 ลิตร ปริมาตรของของไหลที่วัดได้จากการทดลองที่มีคลื่นมีค่ามากกว่าการทดลองที่ไม่มีคลื่นเสียง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ .01

การทดลองที่ 2 การวิเคราะห์ความยาวขาเข้าของท่อที่เป็นจุดกำเนิดการไหลแบบ Fully Developed

2.1) การหาความเร็วและเลขเรย์โนลด์ของการไหลปกติ ของสารละลาย Carboxy methyl cellulose ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร ในท่อยาว 4 เมตร

ตารางที่ 3 ตารางแสดงความเร็วในการไหลของของไหลและเลขเรย์โนลด์ที่คำนวณได้จากสมการ

อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/ วินาที)	ความเร็วใน การไหล (เมตร/วินาที)	เลขเรย์โนลด์
$(8.1 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	0.34 ± 0.02	400 ± 40

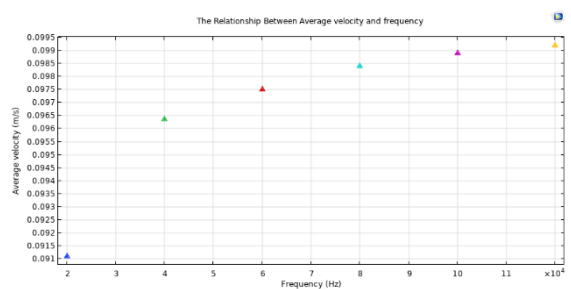
2.2) พิสูจน์ว่าความยาวท่อของชุดการทดลองยาวเพียงพอที่จะเกิดการไหลแบบ Fully Developed

ตารางที่ 4 แสดงความยาวขาเข้าของท่อที่เป็นจุดกำเนิดการไหลแบบ Fully Developed

เลขเรย์โนลด์	ความยาว (เมตร)
400 ± 40	1.3 ± 0.2

จากตารางที่ 3 แสดงความเร็วของการไหลของและเลขเรย์โนลด์ที่คำนวณจากสมการ มีเลขเรย์โนลด์อยู่ที่ 400 ± 40 และตารางที่ 4 แสดงความยาวขาเข้าของท่อที่เป็นจุดกำเนิดการไหลแบบ Fully Developed แสดงให้เห็นว่าความยาวจากจุดเริ่มต้นการไหลที่จะทำให้เกิดการไหลแบบ Fully Developed อยู่ที่ 1.3 ± 0.2 เมตร ซึ่งท่อที่ใช้ในการทดลองมีความยาวเพียงพอ

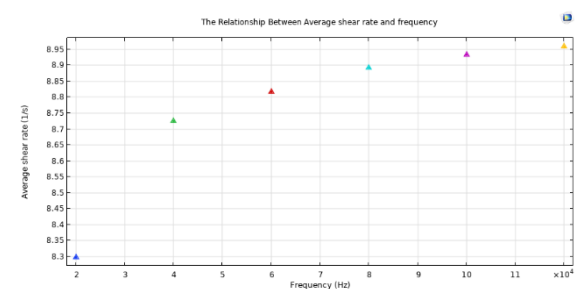
การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนในท่อโดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม CFD



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของการไหลที่ความถี่ต่าง ๆ จากการจำลองเชิงตัวเลข

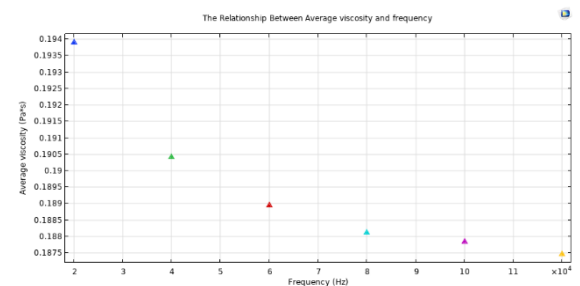
จากภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยของการไหลที่ความถี่ต่าง ๆ จากการจำลองเชิงตัวเลข ความถี่ 20 kHz มีความเร็วเฉลี่ย 0.0911 เมตร/วินาที

ความถี่ 40 kHz มีความเร็วเฉลี่ย 0.0964 เมตร/วินาที ความถี่ 60 kHz มีความเร็วเฉลี่ย 0.0975 เมตร/วินาที ความถี่ 80 kHz มีความเร็วเฉลี่ย 0.0984 เมตร/วินาที ความถี่ 100 kHz มีความเร็วเฉลี่ย 0.0989 เมตร/วินาที ความถี่ 120 kHz มีความเร็วเฉลี่ย 0.0992 เมตร/วินาที ความเร็วเฉลี่ยของของไหลเมื่อได้รับผลจากคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ต่าง ๆ จะมีค่าความเร็วที่แตกต่างกันออกไป โดยเมื่อได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า จะทำให้ของไหลมีความเร็วในการไหลที่มากกว่าการได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนเฉลี่ยภายในของไหล จากการจำลองเชิงตัวเลข

จากภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนเฉลี่ยภายในของไหลจากการจำลองเชิงตัวเลข ที่ความถี่ 20 kHz มีอัตราเฉือนเฉลี่ย 8.2982 วินาที⁻¹ ที่ความถี่ 40 kHz มีอัตราเฉือนเฉลี่ย 8.7255 วินาที⁻¹ ความถี่ 60 kHz มีอัตราเฉือนเฉลี่ย 8.8176 วินาที⁻¹ ความถี่ 80 kHz มีอัตราเฉือนเฉลี่ย 8.8929 วินาที⁻¹ ความถี่ 100 kHz มีอัตราเฉือนเฉลี่ย 8.9342 วินาที⁻¹ ความถี่ 120 kHz มีอัตราเฉือนเฉลี่ย 8.9596 วินาที⁻¹



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉลี่ยภายในของไหล จากการจำลองเชิงตัวเลข

จากภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดปรากฏต่อความยาวในแนวนอนที่มีจากจุดกึ่งกลางท่อ พบว่า

ความหนืดปรากฏของของไหลมีค่าคงที่ตลอดความยาวในแนวรัศมีของท่อ และไม่มีเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่อัตราเฉือนเฉลี่ยในของไหลเมื่อได้รับผลจากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่าง ๆ จะมีค่าอัตราเฉือนเฉลี่ยที่แตกต่างกันออกไป โดยเมื่อได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า จะทำให้ของไหลมีอัตราเฉือนภายในสูงกว่าในกรณีที่ได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า จึงส่งผลให้ความหนืดปรากฏในของไหลที่ได้รับผลจากคลื่นความถี่สูงกว่า มีค่าความหนืดเฉลี่ยต่ำกว่า ในกรณีที่ได้รับผลจากคลื่นความถี่ต่ำกว่า

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวิจัยเรื่อง “การศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนในท่อ” สามารถสรุปและอภิปรายผลการวิจัยได้ ดังนี้

การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนในท่อ

ผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลของการทดลองที่ปราศจากคลื่นอัลตราโซนิก อยู่ที่ $(8.1 \pm 0.2) \times 10^{-4}$ ลูกบาศก์เมตร/วินาที ส่วนอัตราการไหลของการทดลองที่ปล่อยคลื่นเสียงอยู่ที่ $(8.6 \pm 0.2) \times 10^{-4}$ ลูกบาศก์เมตร/วินาที โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 6.7%

การทดลองที่ 2 การวิเคราะห์ความยาวขาเข้าของท่อที่เป็นจุดกำเนิดการไหลแบบ Fully Developed

ผลการทดลองพบว่า ระบบที่ออกแบบไว้มีความยาวเพียงพอที่จะทำให้สารละลาย CMC ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร เกิดการไหลแบบ Fully Developed โดยของไหลจะไหลภายใต้เงื่อนไขด้วยความเร็ว 0.34 ± 0.02 เมตร/วินาที จะมีเลขเรย์โนลด์อยู่ที่ประมาณ 400 ± 40 ซึ่งจะทำให้เกิดการไหลแบบราบเรียบและจะทำให้ความยาวขาเข้าที่เป็นจุดกำเนิดการไหลแบบ Fully Developed อยู่ที่ 1.3 ± 0.2 เมตร

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของคลื่นอัลตราโซนิกต่อการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนในท่อโดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม CFD

ผลการทดลองพบว่า ในแบบจำลองที่มีปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ต่าง ๆ เข้าไปในท่อ จะเห็นว่าความเร็วเฉลี่ยของของไหลเมื่อได้รับผลจากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่าง ๆ จะมีค่าความเร็วที่แตกต่างกันออกไป

โดยเมื่อได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า จะทำให้ของไหลมีความเร็วในการไหลที่มากกว่าการได้รับผลจากคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า แต่ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และอัตราเฉือนเฉลี่ยในของไหลเมื่อได้รับผลจากคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ต่าง ๆ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความถี่ จึงส่งผลให้ความหนืดปรากฏในของไหลที่ได้รับผลจากคลื่นความถี่สูงกว่า มีค่าความหนืดเฉลี่ยต่ำกว่า ในกรณีที่ได้รับผลจากคลื่นความถี่ต่ำกว่า

อภิปรายผลการดำเนินงาน

การที่คลื่นอัลตราโซนิกแพร่เข้าไปในของไหลทำให้เกิดปรากฏการณ์การสั่นของคลื่นในของไหล ซึ่งทำให้เกิด Velocity Gradient ส่งผลให้ความเค้นเฉือนของของไหลเพิ่มขึ้น ด้วยคุณสมบัติของของไหลนอนนิวโตเนียนแบบ shear thinning ที่ความหนืดปรากฏของของไหลจะแปรผกผันกับอัตราเฉือนของของไหล ทำให้เมื่อมีคลื่นอัลตราโซนิกแพร่ผ่านของไหลจะสามารถทำให้ความหนืดปรากฏของของไหลมีค่าลดลงได้ เห็นได้จากแบบจำลองในโปรแกรม CFD เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่มีคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ค่าสนามอัตราเฉือนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก และจะมีค่าสนามความหนืดปรากฏที่น้อยกว่าแบบจำลองที่ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิก และเนื่องจากอะคูสติกสตรีมมิ่ง ส่งผลในระดับจุลภาค จึงทำให้ผลจากคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่าง ๆ นั้นไม่ได้แตกต่างกันมากนักที่จะนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้ จึงอาจต้องใช้ประโยชน์จากคลื่นเสียงในปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในของไหลเข้ามาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งของไหลในระดับอุตสาหกรรม

ในการทดลองจริงที่ได้ออกแบบชุดการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนในท่อ ให้ความแตกต่างของอัตราไหลที่ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากการควบคุมตัวแปรที่ไม่ดีหรือการออกแบบการทดลองที่ไม่เหมาะสม การวัดอัตราไหลอาจไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมในการศึกษาปรากฏการณ์การลดความหนืดของของไหล shear thinning จากคลื่นอัลตราโซนิก

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องดังนี้ โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ ผู้อำนวยการโรงเรียน นายวิชัย ราชธานี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ นางกนกรัตน์ สิงห์น้อย ที่ให้ความกรุณาอย่างสูงในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา และให้ความรู้ในการทำวิจัย การตรวจทานแก้ไขและการเขียนโครงการ วิทยาศาสตร์ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดีมาตลอดจนความห่วงใยและเป็นที่กำลังใจให้แก่คณะผู้จัดทำเสมอมา อาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการเคมี ชีววิทยา และฟิสิกส์ โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย นครศรีธรรมราช ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดีและสุดท้ายผู้ปกครองที่ได้อบรมสั่งสอนและเลี้ยงดูเป็นอย่างดี ทั้งคอยให้กำลังใจ และสนับสนุนการทำโครงการในครั้งนี้ คุณประโยชน์อันเกิดจากโครงการฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ผู้ปกครอง คณะอาจารย์ผู้มีพระคุณ และประเทศชาติต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Amaratunga, M., Rabenjafimanantsoa, H. A., Time, R. W. (2019). Comparison of oscillatory flow conditions in Newtonian and non-Newtonian fluids using PIV and high-speed image analysis. *Flow Measurement and Instrumentation*, 70, 101628.

Anand, M., Kiranmai, P., & Garimella, S. M. (2024). Stability of fully developed pipe flow of a shear-thinning fluid that approximates the response of viscoplastic fluids. *Applications in Engineering Science*, 19, 100191.

Lambride, C., Syrakos, A., & Georgiou, G. C.

(2023). Entrance length estimates for flows of power-law fluids in pipes and channels. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 317, 105056.

Lee, M. W., Yu, K. H., Teoh, Y. H., Lee, H. W., & Ismail, M. A. (2019). Developing flow of power-law fluids in circular tube having superhydrophobic transverse grooves. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 56(1), 1–9.

White, F. M. (1997). *Fluid mechanics* (4th ed.). McGraw-Hill.

Asterios, P. (2007). Effect of transverse magnetic field on flow separation of laminar boundary layers plate. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 7, 487–489.

Misra, J. C., & Shit, G. C. (2007). Effect of magnetic field on blood flow through an artery: A numerical model. *Centre for Theoretical Studies, Indian Institute of Technology Kharagpur, India*.

สมชาย ใจดี, และ วิทยา พรหมศรี. (2553). การศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลในช่วงการไหลแบบราบเรียบผ่านสนามแม่เหล็ก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*, 2, 78–85.