

## การจำลองเชิงตัวเลขของการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบขดท่อแนวตั้งด้วยการใช้คลื่นเหนือเสียง

### Numerical Simulation of Heat Transfer Enhancement of a Vertical Helically Coiled Tube Heat Exchanger using Ultrasound

วีรศิลป์ ภัคตบุญไกรเลิศ<sup>1</sup>, อมลิน ต่องกระโทก<sup>2</sup>, กัณฑ์กรรณ์ เขาทอง<sup>3</sup>, วีรชัย ชัยวรพฤษณ์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

59/5 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถนนมาลัยแมน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม รหัสไปรษณีย์ 73140

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

#### บทคัดย่อ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแนวตั้งถูกนำมาใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรมในประเทศไทย ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาเชิงตัวเลขของการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแนวตั้งด้วยการใช้คลื่นเหนือเสียง คลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังและความถี่เท่ากับ 27.9 วัตต์และ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ ถูกปล่อยจากหัวกำเนิดที่ทำมุม 0, 90, และ 180 องศา นอกจากนี้คลื่นเหนือเสียงยังถูกปล่อยที่ระดับความสูง 7, 36, 64 และ 93% ของความสูงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-epsilon และมีการใช้ตาข่ายข้อมูลแบบสามเหลี่ยม จากผลการวิเคราะห์พบว่าคลื่นเหนือเสียงมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันพบว่าคลื่นเหนือเสียงมีผลกระทบน้อยมากต่อค่าตัวประกอบความเสียดทาน ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นผลทำนายที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงเป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำไปใช้ออกแบบสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแนวตั้งที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียงช่วยในการเพิ่มสมรรถนะได้ต่อไป

**คำหลัก:** คลื่นเหนือเสียง; อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแนวตั้ง; การจำลองเชิงตัวเลข; การแลกเปลี่ยนความร้อน

#### Abstract

Vertical helically coiled tube heat exchanger is utilized in many industries in Thailand. Thus, it is necessary to develop the performance of this heat exchanger. This paper focuses on the numerical investigation of the enhancement of thermal performance of the vertical helically coiled tube heat exchanger using ultrasound. The ultrasonic waves, having the power and frequency of 27.9 W and 24 kHz, respectively are released from the transducer at the angle of 0, 90, and 180 degrees, based on

the inlet tube. Besides, the ultrasound is emitted at the height of 7, 36, 64, and 93% of the heat exchanger height. This research employs the Standard k-epsilon turbulence model and the tetrahedral mesh. From the results, it is found that the waves cause the enhancement of heat transfer in the heat exchanger. In the meantime, the ultrasound slightly affects on the friction factor. This leads to the higher thermal performance. Therefore, the predictive results from this research are the important information, applicable for the design of an ultrasonic vertical helically coiled tube heat exchanger in the future.

**Keywords:** Ultrasound; vertical helically coiled tube heat exchanger; numerical simulation; heat transfer

#### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	พื้นที่หน้าตัดของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (m <sup>2</sup> )
C <sub>p</sub>	ค่าความร้อนจำเพาะ (J/kg.K)
C	ความเร็วเสียง (m/s)
F	เวกเตอร์ของแรง (N)
LMTD	อุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อกของชุดท่อร้อนและน้ำ, (°C)
P	ความดันสถิต (Pa)
Pr	ค่าเลขพรานท์
q"	ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m <sup>2</sup> )
v	ความเร็วของของไหล (m/s)
W	กำลังของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Watt)
ρ	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m <sup>3</sup> )
μ	ความหนืด (Pa.s)

#### 1. บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบชุดท่อแนวตั้งได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม โดยมีการศึกษาสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ทั้งในส่วนที่เป็นการทดลอง [1,2] และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [3,4] เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อน วิธีการหนึ่งที่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้คือการใช้คลื่นเหนือเสียงในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน [5,6] โดยมีการศึกษาทั้งในรูปแบบของการทดลอง [7,8] และการจำลองเชิงตัวเลข [9,10] อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใช้คลื่นเหนือเสียงนั้นมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการจำลองการไหลและการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบชุดท่อแนวตั้งภายใต้คลื่นเหนือเสียงโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้าน

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ANSYS-FLUENT เพื่อศึกษาลักษณะการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำโดยรอบคอยล์ร้อน รวมถึงหาผลกระทบจากตำแหน่งของการปล่อยคลื่นเหนือเสียงต่อการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบชุดท่อแนวตั้งต่อไปได้

#### 2. การตรวจเอกสาร

คลื่นเหนือเสียงจัดเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ซึ่งเป็นความถี่ที่มนุษย์ไม่สามารถที่จะรับรู้ได้ โดยแบ่งเป็นคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำ ซึ่งมีความถี่ในช่วง 20 -100 กิโลเฮิร์ตซ์, คลื่นเหนือเสียงความถี่สูงซึ่งมีความถี่ในช่วง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ – 1 เมกะเฮิร์ตซ์, และคลื่นเหนือเสียงความถี่สูงมากซึ่งมีความถี่มากกว่า 1 เมกะเฮิร์ตซ์ [11] จากการศึกษาเอกสารพบว่าคลื่นเหนือเสียงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมหลายแขนง เช่น ทางด้านอาหาร [12] ทางด้านการแพทย์ [13] และทางด้านวิศวกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [14] เป็นต้น โดยการไหลของของไหลที่ถูกเหนี่ยวนำโดยคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำได้ถูกพิจารณาและนำเสนอเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ Stuart Streaming [15] ซึ่งสมการนี้มีความคล้ายคลึงกับสมการ Navier-Stokes ดังนี้

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

การไหลของของไหลที่ถูกเหนี่ยวนำโดยคลื่นเหนือเสียงนั้นถูกพิจารณาภายใต้สมมติฐานว่ากำลังของคลื่นทั้งหมดถูกใช้เพื่อเหนี่ยวนำการไหลเท่านั้น [16,17] โดยความดันของคลื่นสามารถคำนวณได้จาก

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

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h ของการถ่ายเทความร้อนระหว่างชุดท่อร้อนและน้ำสามารถคำนวณได้จาก

$$h = q'' / \text{LMTD} \quad (3)$$

เลขเรย์โนลด์ของการไหล,  $Re$  ภายในเปลือกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อนสามารถคำนวณได้ตาม [3] ดังนี้

$$Re = \rho U_m D_{eq} / \mu \quad (4)$$

โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล,  $D_{eq}$  คำนวณได้จาก

$$D_{eq} = 4Vs / \pi dL \quad (5)$$

ตัวแปรไร้มิติ Colburn  $j$ -factor,  $j$  ที่ใช้แสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อท่อสามารถคำนวณได้ตาม [18] ดังนี้

$$j = (h / \rho U_m C_p) Pr^{2/3} \quad (6)$$

ค่าตัวประกอบความเสียดทาน,  $f$  สามารถคำนวณได้ตาม [19] ดังนี้

$$f = (2\Delta P / \rho U_m^2)(D_{eq} / L) \quad (7)$$

ค่าตัวประกอบสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน,  $J$  คำนวณได้ตาม [20] ดังนี้

$$J = j \times Re \quad (8)$$

ค่าตัวประกอบกำลังปั๊ม,  $F$  คำนวณได้ตาม [20] ดังนี้

$$F = f \times Re^3 \quad (9)$$

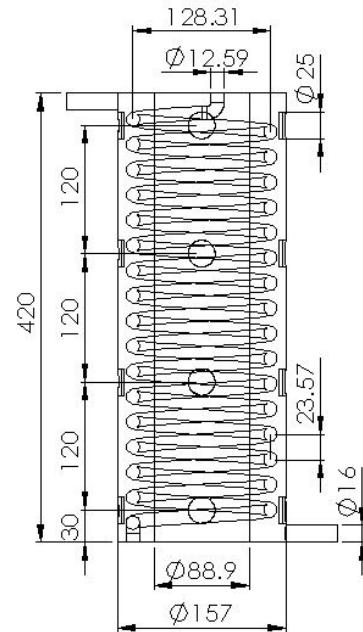
ค่าตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal performance factor, TP) คำนวณได้ตาม [18]

$$TP = (j / j_{ref}) / [(f / f_{ref})]^{1/3} \quad (10)$$

### 3. วิธีการคำนวณ

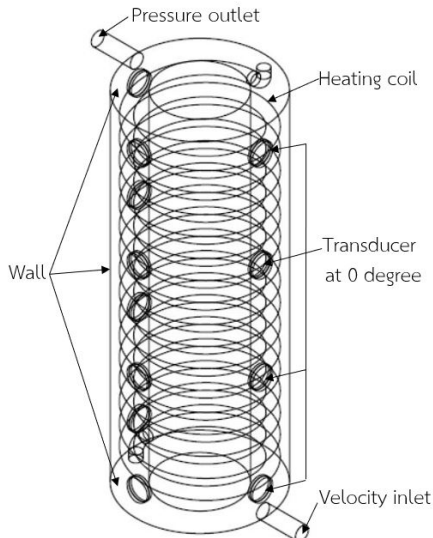
งานวิจัยนี้ได้จำลองการไหลของน้ำผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนตามการทดลองของ [1,2] และมีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังและความถี่เท่ากับ 27.9 วัตต์และ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ โดยคลื่นเหนือเสียงถูกปล่อยจากหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ถูกติดตั้งที่มุม 0, 90, และ 180 องศาที่ท่อทางเข้าของน้ำด้านเปลือก นอกจากนี้คลื่นเหนือเสียงยังถูกปล่อยที่ระดับความสูง 7, 36, 64 และ 93% ของความสูงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบจำลองของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม Solidworks และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ANSYS-FLUENT จำลองการไหลของน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกรบกวนด้วยคลื่นเหนือเสียง แบบจำลองของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลือกเท่ากับ 0.157 เมตร ที่ตรงกลางมีช่องว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.0889 เมตร และความสูงเท่ากับ 0.42 เมตร วงขดของคอยล์ถูกกำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.12831 เมตร และคอยล์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01259 เมตร โดยมีระยะพิตช์ของขดเท่ากับ 0.02357 เมตร ในงานวิจัยนี้ มีจำนวนขดท่อ 16.25 รอบ

ในขณะที่หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.025 เมตร ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการเหนี่ยวนำน้ำให้ไหลตามกำลังและความถี่ของคลื่นเหนือเสียง

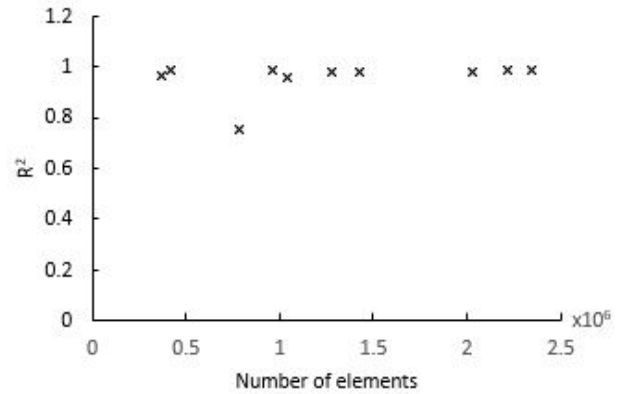


รูปที่ 1 แบบจำลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแนวตั้ง

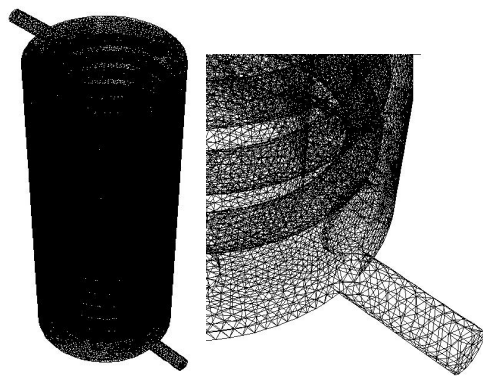
รูปที่ 2 แสดงการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ (Boundary condition) ในงานวิจัยนี้กำหนดให้หัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic transducer) มีกำลังเท่ากับ 27.9 วัตต์ และมีความถี่เท่ากับ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะถูกสมมูลให้เป็นการไหลแบบฉีดตามสมการ (2) เลขเรย์โนลด์ของน้ำที่ทางเข้าถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10,000 ซึ่งตรงกับความเร็วขาเข้าเท่ากับ 0.628 เมตรต่อวินาที ที่ขอบเขตความเร็วขาเข้า (Velocity inlet) ที่ขอบเขตนี้มีการกำหนดให้อุณหภูมิของน้ำขาเข้าทางด้านเปลือกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเท่ากับ 293.15 เคลวิน ตามลำดับ ที่ด้านทางออกของส่วนเปลือกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนถูกกำหนดให้เป็นความดันขาออก (Pressure outlet) มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศหรือ 0 ปาสคาล คอยล์ (Coil) ถูกกำหนดให้เป็นผนังร้อน (Hot wall) มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เท่ากับ 11,075 วัตต์ต่อตารางเมตร ตาข่ายข้อมูลที่ใช้เป็นแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยม (Tetra element) ดังแสดงในรูปที่ 3 มีการกำหนดค่า Spatial discretization ทั้งหมดให้เป็นแบบ Second order upwind ยกเว้น Gradient ที่กำหนดให้เป็น Least squares cell based และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณไว้ที่  $10^{-5}$  ตลอดการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2 เงื่อนไขค่าขอบของแบบจำลองของงานวิจัยนี้



รูปที่ 4 ผลการทดสอบหาค่าขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสม

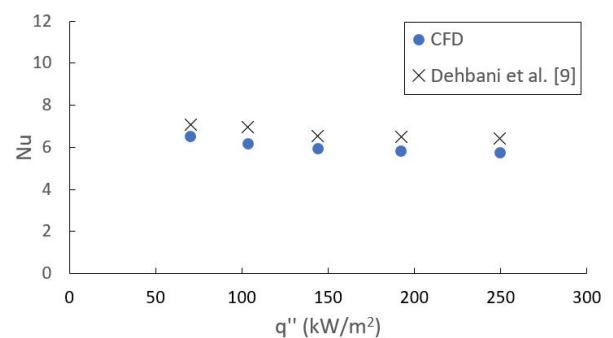


รูปที่ 3 แบบจำลองตาข่ายข้อมูลแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยม

วิธีการทดสอบหาค่าขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ (Mesh sensitivity) ทำได้โดยการกำหนดจำนวนของตาข่ายข้อมูลซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 365,873, 421,102, 780,854, 967,205, 1,036,534, 1,274,920, 1,423,118, 2,026,243, 2,215,213, และ 2,348,767 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงผลการทดสอบหาค่าขนาดของตาข่ายข้อมูลที่เหมาะสม จากการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดท่อร้อนที่ได้จากการทดสอบนี้พบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ขดท่อร้อนเริ่มมีค่าคงที่เมื่อตาข่ายข้อมูลมีจำนวนเท่ากับ 1,036,534 เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงมีการกำหนดให้ตาข่ายข้อมูลมีขนาดตามกรณีที่จำนวนของตาข่ายข้อมูลเท่ากับ 1,036,534 เอลิเมนต์ ตลอดงานวิจัยนี้

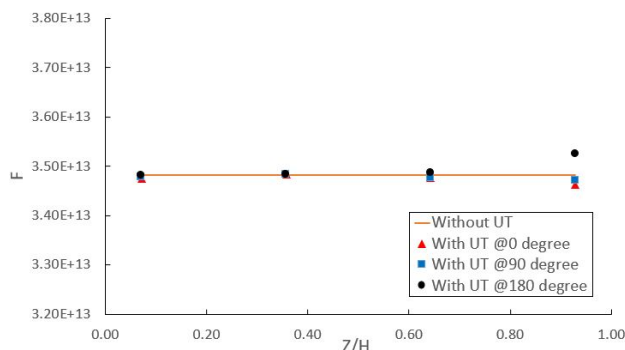
#### 4. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

งานวิจัยนี้ได้มีการสอบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้กับผลการทดลองของ [9] ซึ่งเป็นการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนของลวดร้อนด้วยการใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 27.9 วัตต์ และมีความถี่เท่ากับ 24 กิโลเฮิรตซ์ โดยเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลท์ของลวดร้อน ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าค่าเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการทดลองของ [9] ความแตกต่างนี้คาดว่าเป็นผลเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเชิงตัวเลข ทั้งจากกระบวนการคำนวณและแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 7.85%, 11.52%, 8.81%, 10.43% และ 10.31% ในกรณีที่อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของลวดร้อนมีค่าเท่ากับ 70.3, 103.5, 144, 192.4, และ 249.6 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้สำหรับทำนายการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงต่อไปได้



รูปที่ 5 แสดงผลการสอบเทียบค่าเลขนัสเซิลท์ของลวดร้อนภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่มีกำลังเท่ากับ 27.9 วัตต์

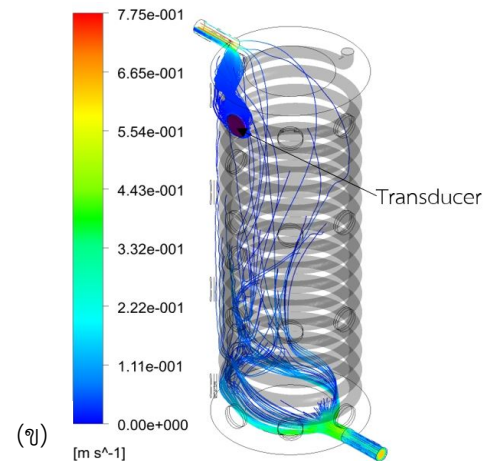
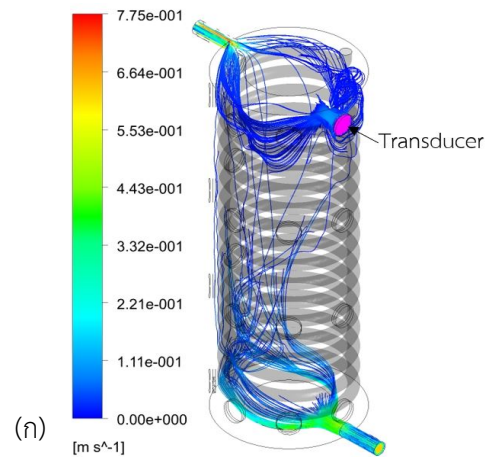
จากการทำนายการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยคลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยจากหัวกำเนิดที่ถูกติดตั้งที่ตำแหน่งแตกต่างกัน พบว่าค่าตัวประกอบกำลังของปั๊ม F ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่ใช้บอกขนาดของปั๊มที่ใช้ในการส่งน้ำเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับชุดท่อร้อนแนวตั้งในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้ถูกแสดงภายใต้สภาวะที่ไม่มีและมีคลื่นเหนือเสียงรบกวนดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าค่า F ภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยออกจากตำแหน่งต่างๆ ในงานวิจัยนี้ ส่วนมากมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากกรณีที่มีการไหลของน้ำปราศจากคลื่นเหนือเสียงรบกวน ซึ่งแสดงว่าปั๊มที่ใช้ในการส่งน้ำเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับชุดท่อร้อนแนวตั้งในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อการไหลมีคลื่นเหนือเสียงรบกวน และยังพบว่าตำแหน่งของการปล่อยคลื่นเหนือเสียงที่ระดับความสูง  $Z/H = 0.93$  ของความสูงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีผลกระทบต่อค่า F ซึ่งค่า F มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ  $3.53 \times 10^{13}$  เมื่อหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงถูกติดตั้งที่ตำแหน่ง 180 องศา แต่ค่า F จะมีค่าลดลงต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวนเมื่อคลื่นถูกปล่อยที่ตำแหน่ง 0 และ 90 องศา นั่นคือทำให้มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้ำผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนลดลงนั่นเอง



รูปที่ 6 แสดงค่า F ของการไหลของน้ำภายใต้กรณีที่มีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน

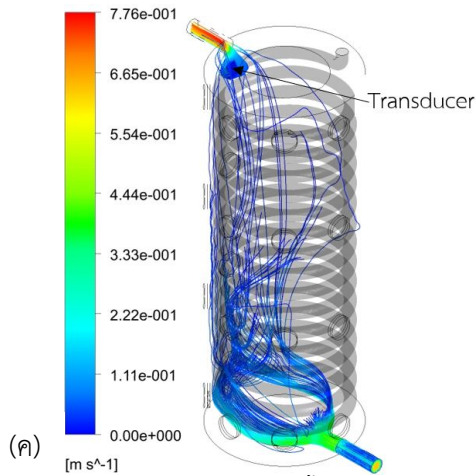
เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของน้ำภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกเหนี่ยวนำโดยคลื่นเหนือเสียงแล้ว จะพบว่าที่ตำแหน่งการติดตั้งหัวกำเนิดที่มุม 0 องศา และที่ระดับความสูง  $Z/H = 0.93$  นั้น คลื่นเหนือเสียงจะเหนี่ยวนำการไหลผ่านกระบวนการการไหลเนื่องจากคลื่นเสียง (Acoustic streaming) ทำให้น้ำมีพลังงานโมเมนตัมมากขึ้นและไหลในทิศทางเดียวกับคลื่นเหนือเสียงดังแสดงในรูปที่ 7(ก) ทำให้น้ำที่ถูกเหนี่ยวนำนี้ไหลเข้าสู่ช่องทางออกได้ง่ายขึ้นและนำไปสู่การลดลงของค่า F และเมื่อทำการย้ายตำแหน่งของหัวกำเนิดมาที่ตำแหน่ง 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 7(ข) แล้วจะพบว่าคลื่นเหนือเสียงยังคงช่วยกระตุ้นการไหลของน้ำไหลเข้าสู่ช่องทางออกได้ง่ายขึ้นเช่นเดียวกัน แต่น้อยกว่ากรณีของ 0 องศา แต่เมื่อทำการติดตั้งหัวกำเนิดที่ตำแหน่ง 180

องศา ซึ่งอยู่ใต้หัวทางออกแล้วจะพบว่าน้ำที่ถูกเหนี่ยวนำโดยคลื่นเหนือเสียงนั้นจะทำการขัดขวางการไหลหลักของน้ำไม่ให้เข้าสู่ช่องทางออกได้สะดวกดังแสดงในรูปที่ 7(ค) การขัดขวางการไหลนี้ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นเพื่อขับดันน้ำให้ไหลได้ตามความเร็วที่กำหนดไว้ ส่งผลให้ค่า F มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดนั่นเอง ดังนั้นผลการวิเคราะห์นี้จึงแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการติดตั้งหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงส่งผลโดยตรงต่อความสูญเสียเนื่องจากการไหลของน้ำผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบชุดท่อแนวตั้งนั่นเอง



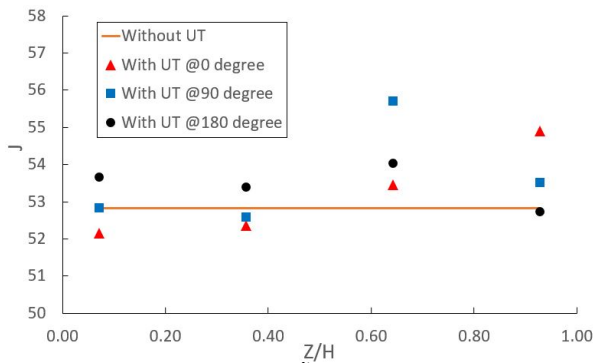


HTE – 009



รูปที่ 7 แสดงการกระจายความเร็วของน้ำภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยจากตำแหน่ง  $Z/H = 0.93$  และมุม (ก) 0, (ข) 90, และ (ค) 180 องศา

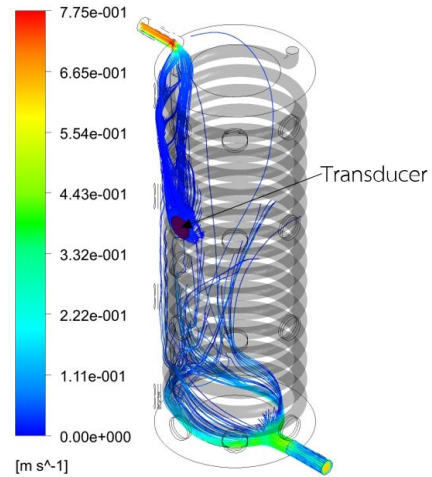
รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน  $J$  ภายใต้สภาวะที่ไม่มีและมีความถี่คลื่นเหนือเสียงรบกวน จากภาพแกน X คือตำแหน่งของหัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่ระดับความสูง  $Z/H = 7, 36, 64,$  และ  $93\%$  ของความสูงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และแกน Y แสดงค่า  $J$  ในช่วง  $50 - 58$  จากรูปพบว่าค่า  $J$  ภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงส่วนมากมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ปราศจากคลื่นเหนือเสียงรบกวน ซึ่งถูกพบว่าค่าสูงสุดเท่ากับ  $55.71$  หรือเพิ่มขึ้น  $5.2\%$  เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความถี่คลื่นเหนือเสียงรบกวน ที่ตำแหน่ง  $90$  องศา และความสูง  $Z/H = 0.64$  นอกจากนี้ยังพบว่า  $J$  มีค่าลดลงต่ำสุดเท่ากับ  $52.17$  หรือ  $1.3\%$  เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความถี่คลื่นเหนือเสียงรบกวน ที่ตำแหน่ง  $0$  องศาและความสูง  $Z/H = 0.07$



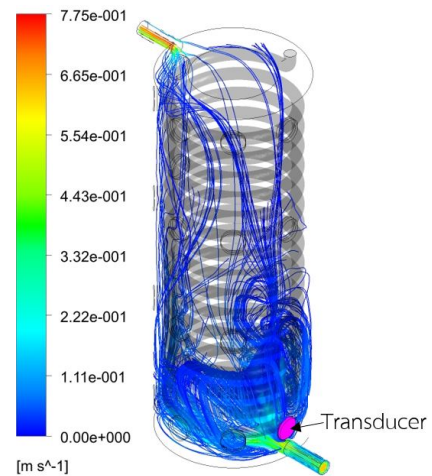
รูปที่ 8 แสดงค่า  $J$  ของการไหลของน้ำภายใต้กรณีที่มีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของน้ำภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกเหนี่ยวนำโดยคลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยจากตำแหน่ง  $90$  องศา และความสูง  $Z/H = 0.64$  ดังแสดงในรูปที่ 9 แล้วจะพบว่าแทนที่น้ำจะไหลจากท่อทางเข้าผ่านคอยล์ร้อนและไหลออกที่

ท่อทางออกเลย คลื่นเหนือเสียงนั้นจะทำหน้าที่เพิ่มโมเมนตัมให้กับการไหลของน้ำ ทำให้น้ำเกิดการไหลผ่านคอยล์ร้อนอีกครั้งที่ตำแหน่งความสูง  $Z/H = 0.64$  ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ท่อทางออกที่ด้านบน เป็นเหตุให้สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของกรณีนี้มีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาการติดตั้งหัวกำเนิดที่ตำแหน่ง  $0$  องศาและความสูง  $Z/H = 0.07$  แล้วจะพบว่า น้ำที่ถูกขับเคลื่อนโดยคลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยจากตำแหน่งนี้ดังแสดงในรูปที่ 10 นั้นจะขัดขวางการไหลของน้ำจากท่อทางเข้าให้ไหลไปที่ด้านตรงข้ามท่อทางเข้าและไหลตรงสู่ท่อทางออก น้ำบางส่วนที่อยู่เหนือหัวกำเนิดจะถูกดึงเข้าสู่บริเวณใกล้หัวกำเนิดและถูกผลักดันโดยคลื่นเหนือเสียงไปด้วยทำให้น้ำที่ไหลจากท่อทางเข้าไม่สามารถเข้าสู่ตำแหน่ง  $0$  องศาที่บริเวณด้านบนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ ทำให้สมรรถนะของการแลกเปลี่ยนความร้อนของกรณีนี้มีค่าลดลงนั่นเอง

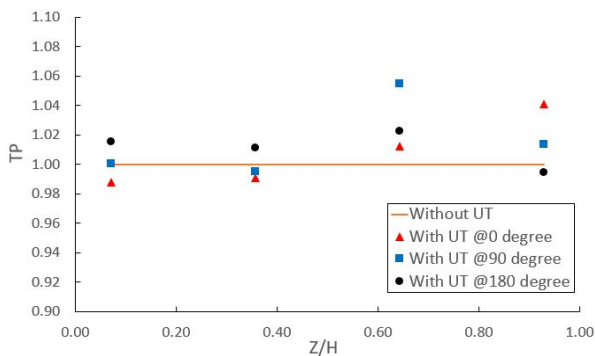


รูปที่ 9 แสดงการกระจายความเร็วของน้ำภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยจากตำแหน่งระดับความสูง  $Z/H = 0.64$  และมุม  $90$  องศา



รูปที่ 10 แสดงการกระจายความเร็วของน้ำภายใต้คลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยจากตำแหน่งระดับความสูง  $Z/H = 0.07$  และมุม  $0$  องศา

สุดท้ายนี้ ยังมีการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของการเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อน TP โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวนดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุด 5.5% เมื่อคลื่นเหนือเสียงถูกปล่อยออกจากตำแหน่ง 90 องศาที่ระดับความสูง  $Z/H = 0.64$  ดังนั้นตำแหน่งนี้จึงเป็นตำแหน่งแนะนำสำหรับการปล่อยคลื่นเหนือเสียงเพื่อเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแนวตั้งนั่นเอง



รูปที่ 11 แสดงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของการไหลของน้ำที่ถูกรบกวนด้วยคลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยจากหัวกำเนิดที่ตำแหน่งต่างๆ

### 5. สรุปผลการจำลองเชิงตัวเลข

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการจำลองการไหลและการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแนวตั้งที่มีฟลักซ์ความร้อนของขดท่อคงที่เท่ากับ 11,075 วัตต์ต่อตารางเมตร ภายใต้การรบกวนของคลื่นเหนือเสียงที่ถูกปล่อยจากหัวกำเนิดซึ่งถูกติดตั้งที่มุม 0, 90, และ 180 องศาจากท่อน้ำทางเข้า และที่ระดับความสูง 7, 36, 64 และ 93% ของความสูงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากผลการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าตำแหน่งของการปล่อยคลื่นเหนือเสียงที่บริเวณใกล้ท่อทางออกส่งผลโดยตรงต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการไหล ถ้ามีการปล่อยคลื่นเหนือเสียงในทิศทางเดียวกับการไหลออกของน้ำจะช่วยลดค่าความสูญเสียเนื่องจากการไหลได้ นอกจากนี้คลื่นเหนือเสียงยังส่งผลทำให้สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 5.5% เมื่อคลื่นถูกปล่อยจากตำแหน่ง 90 องศาและระดับความสูงเท่ากับ 64% ของความสูงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งผลที่ได้นี้จะ เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้คลื่นเหนือเสียงช่วยในการเพิ่มสมรรถนะต่อไปได้ในอนาคต

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศ.ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ สำหรับคำแนะนำอันมีค่าสำหรับการทำวิจัยในเรื่องคลื่นเหนือเสียงนี้

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Ghorbani, H. Taherian, M. Gorji, H. Mirgolbabaei, Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 34, Issue 7, 2010, pp. 900-905.
- [2] Nasser Ghorbani, Hessam Taherian, Mofid Gorji, Hessam Mirgolbabaei, An experimental study of thermal performance of shell-and-coil heat exchangers, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 37, Issue 7, 2010, pp. 775-781.
- [3] S. Bahreghmand, A. Abbassi, Heat transfer and performance analysis of nanofluid flow in helically coiled tube heat exchangers, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 109, 2016, pp. 628-637.
- [4] Hessam Mirgolbabaei, Numerical investigation of vertical helically coiled tube heat exchangers thermal performance, Applied Thermal Engineering, Vol. 136, 2018, pp. 252-259.
- [5] 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.
- [6] Odin Bulliard-Sauret, Sebastien Ferrouillat, Laure Vignal, Alain Momponteil, Nicolas Gondrexon, Heat transfer enhancement using 2MHz ultrasound, Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 39, 2017, pp. 262-271.
- [7] 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.
- [8] Masoud, R., Maryam, D. and Mahdieh, 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.
- [9] Maryam, D., Masoud, R., Mahdieh, 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.



- [10] Abolhasani, M., Rahimi, M., Dehbani, M., & Alsairafi, A. A. (2012). CFD Modeling of Heat Transfer by 1.7 MHz Ultrasound Waves. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 62(10), 822–841.
- [11] Sridhar Pilli, Puspendu Bhunia, Song Yan, R.J. LeBlanc, R.D. Tyagi, R.Y. Surampalli, Ultrasonic pretreatment of sludge: A review, Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 18, Issue 1, 2011, pp. 1-18.
- [12] T.J. Mason, L. Paniwnyk, J.P. Lorimer, The uses of ultrasound in food technology, Ultrasonics Sonochemistry, Vol. 3, Issue 3, 1996, pp. S253-S260.
- [13] Nirmala Murugandoss, Nuala Coyle, Shreelata Datta, Ultrasound in obstetrics and gynaecology, Obstetrics, Gynaecology & Reproductive Medicine, Vol. 29, Issue 2, 2019, pp. 42-50.
- [14] 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.
- [15] Stuart, J.T. (1963). Unsteady boundary layers. Laminar Boundary Layers, L. Rosenhead, Oxford University Press, London.
- [16] Squire, H.B. (1951). The round laminar jet, The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, vol. 4, pp. 321 – 329.
- [17] Lighthill, S.J. (1978). Acoustic streaming, Journal of Sound and Vibration, vol. 61, no. 3, pp. 391 - 418.
- [18] Ahmadali Gholami, Mazlan A. Wahid, H.A. Mohammed, Thermal-hydraulic performance of fin-and-oval tube compact heat exchangers with innovative design of corrugated fin patterns, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 106, 2017, pp. 573-592.
- [19] Cengel, Y.A. and A.J. Ghajar. 2015. Heat and Mass transfer-fundamentals & applications. McGraw-Hill, New York.
- [20] H. Huisseune, C. T'Joel, P. De Jaeger, B. Ameel, S. De Schampheleire, M. De Paepe, Influence of the louver and delta winglet geometry on the thermal hydraulic performance of a compound heat exchanger, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 57, Issue 1, 2013