# การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนแผ่นระนาบโดยใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ต่ำ

# Heat Transfer Enhancement on Flat Plate using Low Frequency Ultrasonic Waves

ณธัช อินทร์วร 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***

งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ต่ำบนแผ่นระนาบในอุโมงค์น้ำที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 68,000, 105,000, และ 140,000 ผิวของแผ่นระนาบจะถูกทำให้ร้อนด้วยการใช้อุปกรณ์กำเนิดความร้อนแบบแผ่นที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 150 วัตต์ แหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจะถูกติดตั้งเหนือแผ่นระนาบเป็นระยะ 0.15 เมตรเพื่อสร้างคลื่นเหนือเสียงให้เคลื่อนที่ในทิศทางลงสู่แผ่นระนาบร้อนที่อยู่ด้านล่าง ที่กำลังของคลื่นเท่ากับ 60 วัตต์ แหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงนี้สามารถสร้างคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำเท่ากับ 25 กิโลเฮิรตซ์ได้ ภายใต้สภาวะทดลองเหล่านี้อุณหภูมิของพื้นผิวร้อนจะถูกบันทึกที่ตำแหน่ง 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, และ 1 เมตร จากขอบด้านหน้าของแผ่นระนาบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวของแผ่นระนาบร้อนมีค่าลดลงเมื่อการไหลหลักของน้ำอยู่ภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียง ส่งผลให้แผ่นระนาบนี้มีการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น เพราะฉะนั้นผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

***คำหลัก***: คลื่นเหนือเสียง; การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน; แผ่นระนาบ; การไหลแบบราบเรียบ

***Abstract***

This research presents the technique of heat transfer enhancement on flat plate using low frequency ultrasonic waves in a water tunnel at Reynolds number of 68,000, 105,000, and 140,000. The plate surface was heated using a plate heater, having the heat transfer rate of 150 W. A transducer, used to generate the ultrasonic waves propagating in downward direction to the heated plate below was installed above the tested plate at the distance of 0.15 m. At the wave power of 60 W, this transducer can initiate the low frequency ultrasonic waves of 25 kHz. Under these conditions, the temperature of the heated plate was recorded at the streamwise distance of 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, and 1 meters from the plate leading edge. The results show that the plate temperature decreases when the mainstream is influenced by the ultrasonic waves. Consequently, it directly increases the rate of heat transfer of the heated plate. Therefore, the obtained results will be important information, leading to the better design of heat exchangers in the future.

*Keywords:* ultrasonic waves; heat transfer enhancement; flat plate; lamina flow

## 1. บทนำ

การถ่ายเทความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการปรับอากาศ รวมไปถึงการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในกระบวนการผลิตต่างมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้จะถูกนำมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากขึ้นในปัจจุบัน อีกทั้งยังมีมลพิษที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆเหล่านั้นอีกด้วย ดังนั้นถ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารสื่อความร้อนและเย็นได้ ก็จะทำให้ระบบความร้อนโดยรวมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งนำไปสู่การใช้เชื้อเพลิงที่ลดลงได้ อีกทั้งยังจะเป็นการลดมลพิษที่เกิดขึ้นอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนของการไหลของน้ำบนแผ่นระนาบร้อน ภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงความถี่ต่ำ โดยผลที่ได้นั้นจะเป็นข้อมูลสำคัญที่นำไปสู่การสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

## 2. การตรวจเอกสาร

### 2.1 คลื่นเหนือเสียง

คลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic waves) คือ คลื่นเสียงที่มีช่วงความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะสามารถได้ยิน มีค่ามากกว่า 16 ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์ คลื่นเหล่านี้จะถูกจำแนกประเภทตามความถี่ โดยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วง 20 ถึง 100 กิโลเฮิรตซ์ จะถูกกำหนดให้เป็นช่วงที่มีความถี่ต่ำ [1] โดยเมื่อปล่อยคลื่นเหนือเสียงในช่วงความถี่ดังกล่าวเข้าไปในของเหลว จะเกิดปรากฏการสำคัญ 2 แบบคือ Acoustic cavitation และ Acoustic streaming ซึ่งเป็น 2 ปรากฏการณ์สำคัญที่ช่วยในเรื่องของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน [2-4]

### 2.2 การแลกเปลี่ยนความร้อน

โดยปกติแล้วการไหลแบบราบเรียบบนแผ่นระนาบจะสามารถคำนวณเลขเรย์โนลด์เฉพาะที่ (Local Reynolds Number) ได้จาก:

$$\mathrm{Re}_x = \frac{\rho V x}{\mu} \qquad (1)$$

เมื่อ

$\mathrm{Re}_x$ คือ เลขเรย์โนลด์เฉพาะที่

$\rho$ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m$^3$

$V$ คือ ความเร็วของของไหล, m/s

$x$ คือ ระยะทางตามทิศการไหลหลัก เมื่อวัดจากขอบด้านหน้าของแผ่นระนาบ, m

$\mu$ คือ ค่าความหนืดของของสัมบูรณ์, kg/m.s

เลขนัสเซลท์เฉพาะที่เป็นตัวแปรที่แสดงค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อมีการไหลแบบราบเรียบบนแผ่นระนาบที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ทั่วทั้งแผ่น สามารถคำนวณได้จาก:

$$Nu_x = 0.453\,\mathrm{Re}_x^{0.5}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \qquad (2)$$

เมื่อ

$Nu_x$ คือ เลขนัสเซลท์เฉพาะที่

$\mathrm{Pr}$ คือ เลขแพรนท์

โดยสมการที่ 2 จะสามารถใช้ได้ก็ต่อเมื่อการไหลมีค่า $Re_x < 5\times10^5$ และ $Pr > 0.6$ [5] อย่างไรก็ตามเลขนัสเซลท์ เฉพาะที่เมื่อการไหลเป็นแบบราบเรียบบนแผ่นระนาบที่มีระยะของส่วนที่ไม่ได้รับความร้อน, $Nu_{x,uh}$ สามารถคำนวณได้จาก:

$$Nu_{x,uh} = \frac{Nu_x}{[1-(\xi/x)^{3/4}]^{1/3}} \qquad (3)$$

เมื่อ

$\xi$ คือ ความยาวที่วัดจากขอบด้านหน้าของแผ่นระนาบที่ไม่ได้รับความร้อน, m

โดยเลขนัสเซลท์มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่, $h_x$ ดังนี้:

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} \qquad (4)$$

เมื่อ

$k$ คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m.K

อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่, $\dot{q}$ สามารถคำนวณได้จาก:

$$\dot{q} = h_x(T_s - T_\infty) \qquad (5)$$

เมื่อ

$T_s$ คือ อุณหภูมิของพื้นผิว, °C

$T_\infty$ คือ อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้า, °C

โดยที่

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A_s} \qquad (6)$$

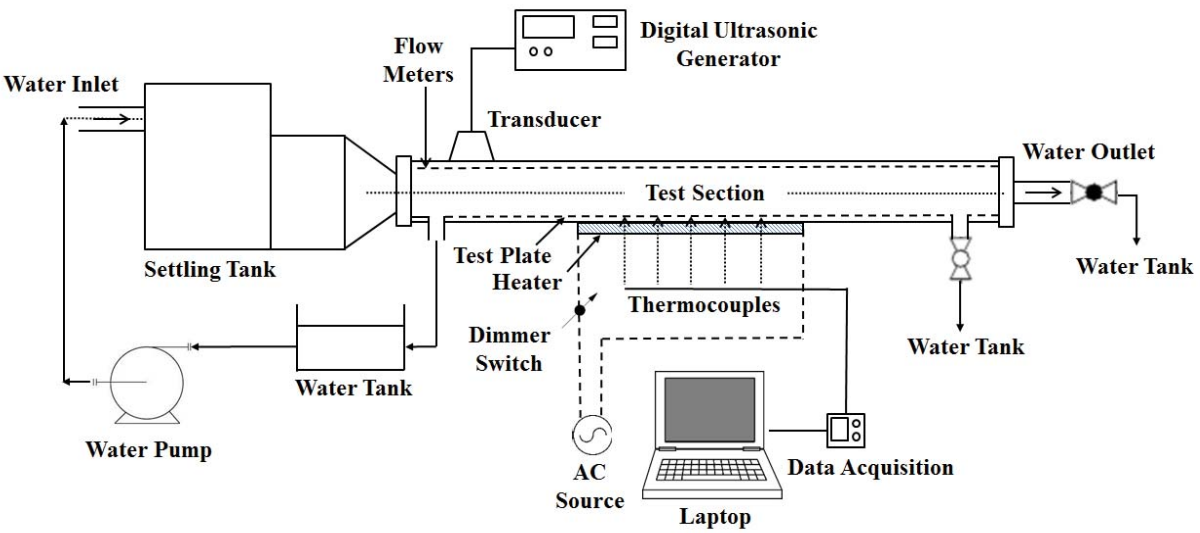
เมื่อ

$\dot{Q}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

$A_s$ คือ พื้นที่ผิวของแผ่นราบที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน, $m^2$

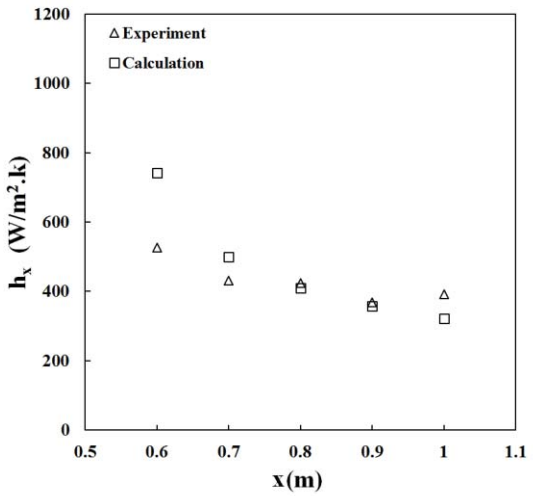
## 3. การทดลอง

ในการทดลองนี้จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองดังแสดงในรูปที่ 1 การทดลองนี้จะมีการใช้ปั๊มน้ำเพื่อนำน้ำจากถังเก็บน้ำเข้าสู่อุโมงค์น้ำที่มีความปั่นป่วนต่ำที่การไหลหลักมีค่าความเข้มข้นของความปั่นป่วนเท่ากับ 1% โดยส่วนทดลองของอุโมงค์น้ำนี้มีขนาดเท่ากับ 0.15 เมตร x 0.2 เมตร x 1.5 เมตร ทำจากแผ่นอะครีลิคใสที่มีขนาดความหนาเท่ากับ 1 เซนติเมตร แผ่นระนาบในส่วนทดลองถูกสร้างจากแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร มีการติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดความร้อนแบบแผ่นที่มีขนาดกำลังเท่ากับ 150 วัตต์ที่ระยะตั้งแต่ 0.55 - 1 เมตร วัดจากขอบด้านหน้าของแผ่นระนาบ ที่ด้านบนของแผ่นระนาบจะมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบบางที่ตำแหน่ง $x$ = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1 เมตรโดยวัดจากขอบด้านหน้าของแผ่นระนาบ ที่ทางเข้าของส่วนทดลอง




รูปที่ 1 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

จะมีการระบายน้ำออกเพื่อสร้างชั้นชิดผิวให้ที่ขอบด้านหน้าของแผ่นระนาบเพื่อสร้างชั้นชิดผิวใหม่ให้กับการไหลบนแผ่นระนาบ โดยที่การไหลของน้ำในส่วนนี้จะถูกควบคุมให้มีความเร็วเท่ากับ 0.07, 0.1, และ 0.14 เมตรต่อวินาที ซึ่งตรงกับเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 68,000, 105,000 และ 140,000 ตามลำดับ เมื่อคำนวณจากความยาวของแผ่นระนาบเท่ากับ 1 เมตร อุณหภูมิของน้ำจะถูกวัดที่ทางเข้าของส่วนทดลองและถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 24 องศาเซลเซียส จากการทดสอบการไหลของน้ำในส่วนทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ที่วัดได้จากอุโมงค์น้ำนี้มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2

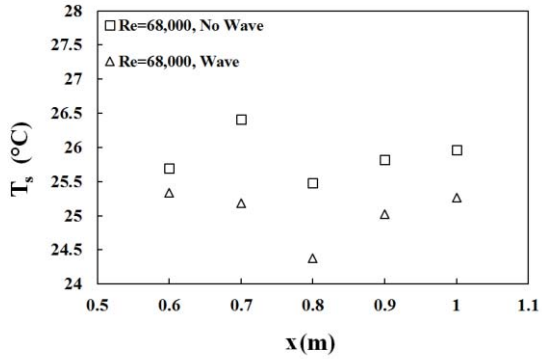



รูปที่ 2 ค่า $h_x$ ที่ระยะ $x$ เท่ากับ 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, และ 1 เมตร

คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ 25 กิโลเฮิรตซ์ ถูกสร้างด้วยหัวจ่ายคลื่นเหนือเสียง (Transducer) ที่ถูกติดอยู่ด้านบนส่วนทดลองระยะ $x$ = 0.5 เมตร โดยหัวจ่ายคลื่นเหนือเสียงที่มีขนาดกำลังเท่ากับ 60 วัตต์นี้จะถูกควบคุมโดยแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วของการไหลแบบใบพัดที่บริเวณขอบด้านหน้าของแผ่นระนาบ เพื่อวัดความเร็วของน้ำที่ไหลเข้าในส่วนการทดลอง

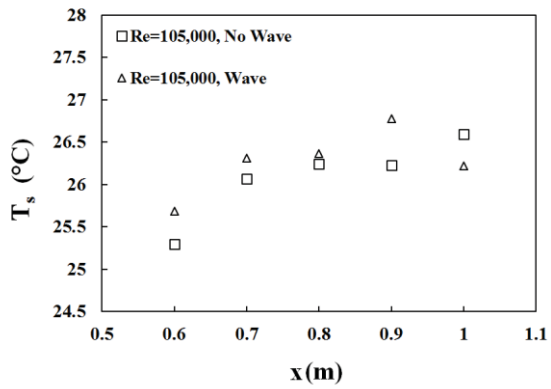
## 4. ผลจากการทดลอง

เมื่อทำการวัดอุณหภูมิของพื้นผิวทดสอบที่ตำแหน่ง $x$ = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, และ 1 เมตรจากขอบด้านหน้าของแผ่นระนาบ พบว่าเมื่อการไหลของน้ำมีเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 68,000 อุณหภูมิที่ผิวมีค่าเท่ากับ 25.7, 26.4, 25.5, 25.9, และ 26 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อทำการปล่อยคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25 กิโลเฮิรตซ์แล้ว พบว่าอุณหภูมิมีค่าลดลง 0.4, 1.2, 1.1, 0.8, และ 0.7 องศาเซลเซียสตามตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิที่พื้นผิว



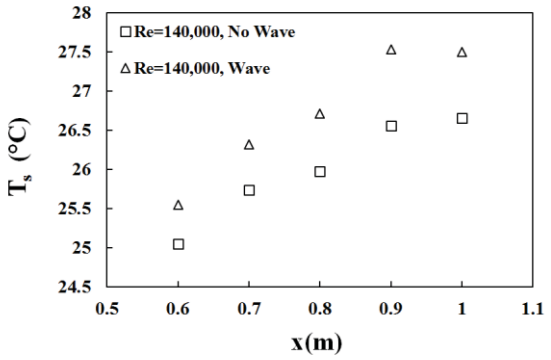

รูปที่ 3 อุณหภูมิที่พื้นผิวขณะที่มีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงที่ $Re$ = 68,000

เมื่อการไหลของน้ำมีเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 105,000 อุณหภูมิพื้นผิวที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 25.3, 26.1, 26.2, 26.2, และ 26.6 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเมื่อทำการปล่อยคลื่นเหนือเสียงรบกวนการไหล จะพบว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวลดลงเท่ากับ 0.4 องศาเซลเซียสที่ตำแหน่ง $x$ = 1 เมตร เท่านั้น ในขณะที่อุณหภูมิพื้นผิวที่ตำแหน่ง $x$ = 0.6, 0.7, 0.8, และ 0.9 เมตร จะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.4, 0.2, 0.2, และ 0.6 องศาเซลเซียสตามลำดับ




รูปที่ 4 อุณหภูมิที่พื้นผิวขณะที่มีและไม่มีคลื่นเหนือเสียง ที่ *Re* = 105,000

และเมื่อทำการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ของการไหลของน้ำให้มีค่าเท่ากับ 140,000 แล้วจะพบว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น 0.5, 0.6, 0.7, 1.1, และ 0.8 องศาเซลเซียสหลังจากปล่อยคลื่นเหนือเสียง ซึ่งจากเดิมมีค่าเท่ากับ 25, 25.7, 26, 26.6, และ 26.7 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5




รูปที่ 5 อุณหภูมิที่พื้นผิวขณะที่มีและไม่มีคลื่นเหนือเสียง ที่ *Re* = 140,000

ในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดตัวแปรอัตราส่วนของอุณหภูมิหลังเปิดคลื่นเหนือเสียง, $\theta_x$ คือ

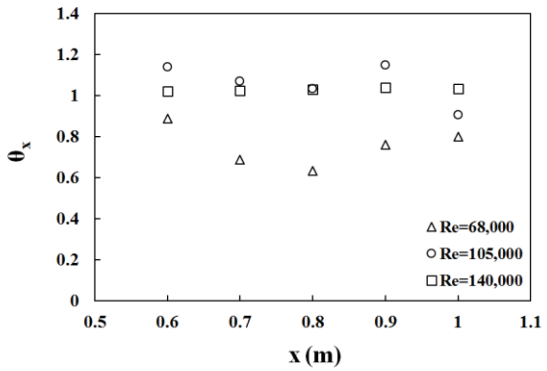
$$\theta_x = (T_{w,x} - T_\infty)/(T_{nw,x} - T_\infty)$$

เมื่อ

$T_{w,x}$ คือ อุณหภูมิพื้นผิวเฉพาะที่ หลังการเปิดคลื่นเหนือเสียง

$T_{nw,x}$ คือ อุณหภูมิพื้นผิวเฉพาะที่ ก่อนการเปิดคลื่นเหนือเสียง

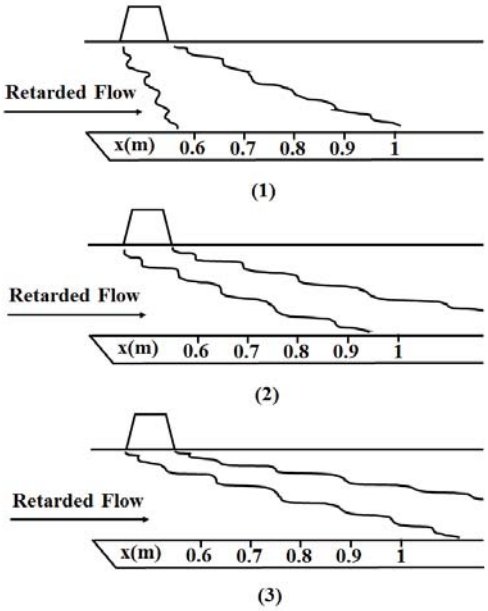
เมื่อทำการหาค่า $\theta_x$ ของการไหลทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าคลื่นเหนือเสียง สามารถลดอุณหภูมิของพื้นผิวร้อนในช่วง 0.6-1 เมตรได้ทั้งหมดและลดลงได้มากที่สุดถึง $\theta_x$ = 0.6 ที่เลขเรย์โนลด์เท่ากับ 68,000 ในขณะที่การไหลมีเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 105,000 ค่า $\theta_x$ จะมีค่ามากกว่า 1 หรือมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นหลังการเปิดคลื่นเหนือเสียง ที่ตำแหน่ง 0.6-0.9 เมตร แต่ $\theta_x$ จะมีค่าน้อยกว่า 1 หรือมีอุณหภูมิลดลงที่ตำแหน่ง *x* = 1 เมตร และเมื่อการไหลมีเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 140,000 จะพบว่า $\theta_x$ มีค่ามากกว่า 1 ตลอดช่วง *x* = 0.6-1 เมตร




รูปที่ 6 อัตราส่วนของอุณหภูมิหลังการเปิดคลื่นเหนือเสียงที่ x = 0.6-1 เมตร

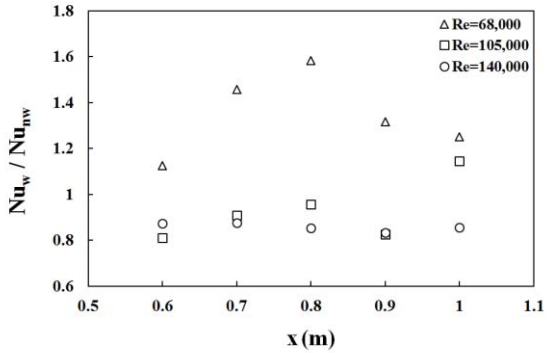
จากผลที่ได้ในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อน้ำไหลด้วยความเร็วต่ำ หรือมี *Re* = 68,000 คลื่นเหนือเสียงที่ถูกสร้างโดยหัวจ่ายที่ถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของส่วนการทดลอง จะเคลื่อนที่และนำพาน้ำที่อยู่เหนือชั้นชิดผิว ที่อุณหภูมิต่ำลงมาตกกระทบผิวร้อนที่บริเวณ x = 0.6-1 เมตร ดังแสดงในรูป 7-1 ทำให้อุณหภูมิที่ผิวที่บริเวณนี้มีค่าลดลง แต่เมื่อทำการเพิ่มความเร็วให้มีค่า *Re* = 105,000 จะพบว่าคลื่นเหนือเสียงได้ถูกกระแสไหลหลักของน้ำพัดไปด้านท้ายน้ำมากขึ้น ทำให้คลื่นเหล่านี้ตกกระทบกับระนาบร้อนที่บริเวณไกลออกไป จากผลที่ได้ทำให้ทราบว่า คลื่นเหนือเสียงนี้ได้ตกกระทบกับระนาบร้อนที่ระยะ *x* = 1 เมตร

ดังแสดงในรูปที่ 7-2 ส่งผลให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้มีค่าลดลงภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ระยะ $x$ = 0.6-0.9 เมตร หลังการปล่อยคลื่นเหนือเสียง อาจเป็นผลเนื่องจากคลื่นเหนือเสียงที่ตกกระทบที่ตำแหน่ง $x$ = 1 เมตรทำการขวางการไหล ทำให้การไหลของน้ำที่บริเวณกึ่งกลางช่องทางไหลนี้เคลื่อนที่ช้าลง และนำมาซึ่งการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ลดลง โดยจะพบได้ชัดเจนขึ้นเมื่อการไหลมีความเร็วสูงขึ้นหรือมีค่า $Re$ = 140,000 ดังแสดงในรูปที่ 7-3



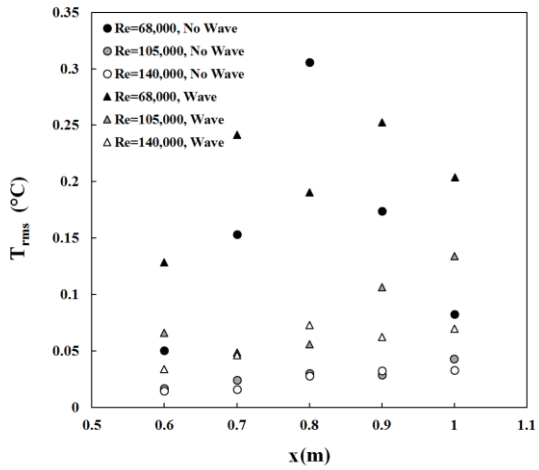

รูปที่ 7 ผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงต่อระนาบร้อนที่ $Re$ = (1) 68,000, (2) 105,000, และ (3) 140,000

รูปที่ 8 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลท์ขณะที่มี, $Nu_w$ และไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน, $Nu_{nw}$ จากรูปพบว่าที่ $Re$ = 68,000 เลขนัสเซลท์ภายใต้อิทธิพลของคลื่นเหนือเสียงมีค่าเพิ่มมากขึ้นถึง 60% ที่ตำแหน่ง $x$ = 0.8 เมตร อีกทั้งยังพบว่าคลื่นเหนือเสียงสามารถเพิ่มเลขนัสเซลท์ได้ 20% ที่ตำแหน่ง $x$ = 1 เมตรที่ $Re$ = 105,000 อย่างไรก็ตามตำแหน่งต้นน้ำก่อนการตกกระทบของคลื่นเหนือเสียงบนผิวร้อนที่ $Re$ = 105,000 และ 140,000 เลขนัสเซลท์จะมีค่าลดลงและลดลงต่ำที่สุดถึง 20%




รูปที่ 8 ค่าอัตราส่วนระหว่างเลขนัสเซลท์ขณะที่มีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน

นอกจากนี้ค่าการกวัดแกว่งของอุณหภูมิที่พื้นผิว, $T_{rms}$ ที่ถูกวัดที่ระยะ $x$ = 0.6-0.1 เมตร ภายใต้สภาวะมีคลื่นและไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวนที่ $Re$ = 68,000, 105,000, และ 140,000 ยังได้ถูกแสดงดังรูปที่ 9 จากรูปพบว่าคลื่นเหนือเสียงส่งผลให้มีค่าการกวัดแกว่งของอุณหภูมิที่พื้นผิวเพิ่มขึ้น โดยจะส่งผลกระทบทำให้ค่าการกวัดแกว่งของอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นมากเมื่อคลื่นเหนือเสียงตกกระทบโดยตรงสู่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ $Re$ = 68,000 รวมไปถึงที่ระยะ $x$ = 1 ที่ $Re$ = 105,000




รูปที่ 9 ค่าการกวัดแกว่งของอุณหภูมิขณะที่มีและไม่มีคลื่นเหนือเสียงรบกวน

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของแผ่นระนาบโดยการใช้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่เท่ากับ 25 กิโลเฮิรตซ์ ในอุโมงค์น้ำที่มีความปั่นป่วนต่ำ พบว่าคลื่นเหนือเสียงนี้จะเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือเลขนัสเซลท์ได้ถึง 60% ในตำแหน่งที่คลื่นตกกระทบเต็มที่ อย่างไรก็ตามคลื่นที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวนี้จะส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณต้นน้ำก่อนถึงตำแหน่งตกกระทบ ทำให้บริเวณเหล่านี้มีเลขนัสเซลท์ลดลงมากที่สุดถึง 20% ดังนั้นถ้ามีการประยุกต์ใช้คลื่นเหนือเสียงเพื่อเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนของแผ่นระนาบร้อน ตำแหน่งของการตกกระทบของคลื่นเหนือเสียงจะเป็นตัวแปรสำคัญที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาเพื่อนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนบนแผ่นระนาบได้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศ.ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ที่ให้คำปรึกษาตลอดงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับเงินทุนวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

*[1] T. J. Mason and J. P. Lorimer, Sonochemistry: Theory, Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry, Ellis Horwood, Chichester, UK, 1988.*

*[2] R. E. Apfel, “Acoustic cavitation inception,” Ultrasonics, vol.22, no. 4, pp. 167–173, 1984.*

*[3] E. A. Neppiras, “Acoustic cavitation series: part one. Acoustic cavitation: an introduction,” Ultrasonics, vol. 22, no. 1, pp. 25–28, 1984.*

*[4] S. J. Lighthill, “Acoustic streaming,” Journal of Sound and Vibration, vol. 61, no. 3, pp. 391–418, 1978.*

*[5] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, “Heat and mass transfer: fundamentals and applications,” McGraw-Hill, New York, 2015.*