

# ปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของชุดทำความร้อนในเครื่องทำน้ำอุ่นขนาดเล็กแบบไฟฟ้า

## Thermal Efficiency Improvement of the Heating Unit for Small Electric Water Heater

สุนิติ เกิดหนูวงศ์<sup>1\*</sup> และศุภฤกษ์ ศิริเวทิน<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 0-2913-2500-24 ต่อ 6437 โทรสาร 0-2587-3921 อีเมล <sup>1</sup> [snt@kmutnb.ac.th](mailto:snt@kmutnb.ac.th)

### บทคัดย่อ

ปัญหาทางด้านพลังงานเป็นปัญหาที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบัน ดังนั้นเพื่อเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานให้มีคุณค่ามากที่สุด เครื่องทำน้ำอุ่นขนาดเล็กแบบใช้ไฟฟ้า จึงถูกเลือกมาเป็นกรณีศึกษา ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องทำน้ำอุ่นขนาดเล็กแบบใช้ไฟฟ้า คือ ชุดทำความร้อนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง จึงจำเป็นต้องออกแบบเอาไว้ที่จุดเหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาคำนวณชุดทำความร้อนที่เหมาะสมกับขนาดของถังเก็บน้ำ ด้วยวิธีการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อปรับปรุงให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทำน้ำอุ่นมีค่าสูงสุด โดยทำการศึกษาคำนวณชุดทำความร้อนแบบ 4 ขด และ 8 ขด รวมทั้งทำการศึกษาลักษณะการไหลของน้ำในถังเก็บน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดอุณหภูมิของน้ำอุ่นจากการทดลองกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในปัญหาที่มีจำนวนชุดทำความร้อน 8 ขด พบว่าผลค่าตอบที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำประมาณ 96 % และจากผลการวิเคราะห์พบว่าจำนวนชุดทำความร้อนแบบ 4 ขด สามารถผลิตน้ำอุ่นที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิได้ประมาณ 7 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชุดทำความร้อนแบบ 8 ขด สามารถผลิตน้ำอุ่นที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิได้ประมาณ 12 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราไหลของน้ำอุ่นที่มีชุดทำความร้อน 8 ขด จะมีค่าสูงกว่าเครื่องทำน้ำอุ่นที่มีชุดทำความร้อน 4 ขด ถึง 5 เท่า

**คำสำคัญ:** เครื่องทำน้ำอุ่นขนาดเล็กแบบใช้ไฟฟ้า, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ชุดทำความร้อน

### Abstract

The energy consumption is a serious problem in the present time. To persuade people to realize in the more efficiently usage of energy, the residential electric water heater was chosen for the case study. In order to reduce the energy consumption of a small

residential electric water heater, the optimum design for the heating unit is necessary.

This aim of this work is to study a suitable number of turns for the helical coil heater using experimental measurement and finite element analysis (FEA). This work has studied the thermal efficiency produced by 4-turn and 8-turn of helical coil heaters. The characteristic of warm water flow within the tank was also investigated.

The finite element result was validated with the result obtained by experiment for the heating unit having 8-turn helical coil heater. It was found that the accuracy of FE result is about 96 percent. It has been found also by FEA that 4-turn helical coil heater is capable to produce the difference in temperature,  $\Delta T$  only 7 degree Celsius, whereas 8-turn coil heater can produce  $\Delta T$  of about 12 degree Celsius. The flow rate of warm water in the FE model having 8-turn coil heater has found to be about 5 times higher than the 4-turn coil heater model.

**Keywords:** Small Electric Water Heater, Finite Element Method Coil Heater

### 1. คำนำ

เนื่องจากความแปรปรวนของสภาพอากาศที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ประกอบกับลักษณะการดำเนินชีวิตที่เปลี่ยนแปลงไปของคนไทยในปัจจุบัน เครื่องทำน้ำอุ่นขนาดเล็กจึงได้เข้ามามีบทบาทชีวิตประจำวันของคนไทยเพิ่มมากขึ้น เครื่องทำน้ำอุ่นขนาดเล็กที่นิยมใช้ตามบ้านส่วนใหญ่จะเป็นแบบใช้ไฟฟ้า ซึ่งติดตั้งง่าย มีราคาถูก และสะดวกกว่าแบบใช้แก๊สสูงตาม เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องกังวลว่าแก๊สจะหมดถึงเมื่อใด แต่อย่างไรก็ดี เครื่องทำน้ำอุ่นแบบใช้ไฟฟ้าจะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งประสิทธิภาพทางความร้อนที่ทำได้ก็ยังไม่ถึงจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimum)

เครื่องทำความร้อนขนาดเล็กแบบใช้ไฟฟ้าที่มีขายอยู่ในประเทศไทย จะมาจากแหล่งผลิตหลายแหล่งทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยด้วยเช่นกัน แต่เครื่องทำความร้อนที่มีราคาถูกส่วนใหญ่จะผลิตจากประเทศไทยและประเทศจีน ผู้ผลิตเครื่องทำความร้อนในประเทศไทยกำลังประสบปัญหาหนักในด้านการแข่งขันราคากับผู้ผลิตจากประเทศจีน โดยจะมีราคาสูงกว่าเครื่องทำความร้อนที่ผลิตในประเทศจีนอยู่ประมาณ 15 % จึงทำให้การส่งออกไปขายในต่างประเทศประสบกับสภาวะปัญหาหนักถนัด การแข่งขันราคากับผู้ผลิตจากประเทศจีน โดยจะมีราคาสูงกว่าเครื่องทำความร้อนที่ผลิตในประเทศจีนอยู่ประมาณ 15 % จึงทำให้การส่งออกไปขายในต่างประเทศประสบกับสภาวะปัญหาหนักถนัด ด้วยเหตุนี้ผู้ผลิตเครื่องทำความร้อนในประเทศไทยจึงจำเป็นต้องทำการแข่งขันในด้านคุณภาพแทนด้านราคา บริษัทผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ในระดับสูงมาทำการออกแบบ ซึ่งก็จะส่งผลกระทบต่อในด้านต้นทุนที่เพิ่มขึ้นทำให้ราคาของเครื่องทำความร้อนต้องสูงตามไปด้วย เพื่อเป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมเครื่องทำความร้อนในไทยให้สามารถแข่งขันในตลาดโลกได้ ผู้ผลิตเครื่องทำความร้อนในประเทศไทยจึงต้องทำการวิจัยและพัฒนาเพื่อออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องทำความร้อนให้ถึงจุดที่เหมาะสมที่สุด จะทำให้บริษัทผู้ผลิตสามารถสร้างจุดขายในด้านการประหยัดพลังงานของเครื่องทำความร้อนขนาดเล็กได้ ซึ่งการประหยัดพลังงานนี้ ก็เป็นประเด็นที่สำคัญอันหนึ่งในการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค นอกเหนือไปจากราคา ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) เพื่อศึกษาจำนวนขนาดของขดลวดความร้อนที่เหมาะสม กับขนาดของถังเก็บน้ำภายใน และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของชุดทำความร้อนในเครื่องทำความร้อนขนาดเล็กแบบใช้ไฟฟ้าให้ใกล้เคียงกับจุดที่เหมาะสมที่สุด

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hegazy และ Diab [1] ได้ศึกษาอัตราการใช้พลังงานของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า ซึ่งมีขนาดถังเก็บน้ำที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังแตกต่างกันสองขนาด ที่อัตราจ่ายน้ำ 5 ลิตรต่อ นาที และ 10 ลิตรต่อ นาที โดยใช้ชุดความร้อน 3 แท่ง ซึ่งมีความยาวแตกต่างกัน พบว่าถ้าเพิ่มอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังและลดอัตราการจ่ายน้ำลงจะได้ประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น

Kar และ Al-Dossary [2] ได้ เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าแบบถังเก็บน้ำเดี่ยว (Single-tank) และถังเก็บน้ำคู่ (Dual-tank) พบว่าแบบถังเก็บน้ำคู่ จะให้ปริมาณความร้อนที่อุณหภูมิที่ต้องการสูงกว่าแบบถังเก็บน้ำเดี่ยว ประมาณ 10 % และใช้พลังงานน้อยกว่า 4.5 %

Fanney และ Dougherty [3] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าตามบ้านในช่วงเวลาที่ไม่มีการใช้ไฟฟ้าเกินปกติ (Off-peak) โดยการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องทำความร้อนที่ได้มาตรฐานขั้นต่ำของ National Appliance Energy Conservative Act. ปี 1991 จะเปลี่ยนแปลงไปถึง 7 %

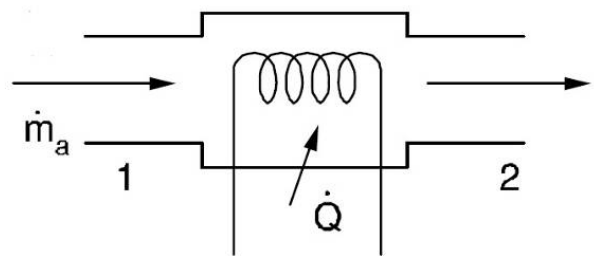
Hsiao, Wei และ Wang [4] ได้ศึกษาการกระจายของอุณหภูมิแบบสามมิติ ของแท่งฮีตเตอร์ ซึ่งบรรจุขดลวดความร้อนแบบสปริง

(Spiral Electric Resistor) เอาไว้ข้างใน คณะวิจัย พบว่าไฟฟ้ากระแสตรงทำให้แท่งฮีตเตอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าไฟฟ้ากระแสสลับ และ ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับมีผลกระทบน้อยมาก

ผลงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าแบบใช้ถังเก็บขนาดใหญ่ ส่วนเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าขนาดเล็กแบบที่ใช้กันในประเทศไทย ยังไม่มีรายงานการวิจัย โดยความยุ่งยากที่ประสบในการออกแบบเครื่องทำความร้อนด้วยไฟฟ้าขนาดเล็กนี้ ก็คือการศึกษาลักษณะการใช้งานและปริมาณน้ำที่ใช้ของผู้บริโภค ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดของถังเก็บน้ำร้อนและชุดทำความร้อน นอกจากนี้ ปัญหาที่พบก็คือ ถ้าชุดทำความร้อนให้ความร้อนจนทำให้น้ำกลายเป็นไอ ไอน้ำก็จะไปขัดขวางการไหลของน้ำร้อนขึ้นมา ดังนั้นการออกแบบชุดทำความร้อนและถังเก็บน้ำร้อนจะต้องมีความเหมาะสมซึ่งกันและกัน จึงจะทำให้เกิดประสิทธิภาพการทำความร้อนสูงสุดและจะช่วยลดอัตราการใช้พลังงานลงด้วย

### 2.2 ทฤษฎี

ในการวิเคราะห์ปัญหานี้ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะมีทฤษฎีทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) และทฤษฎีทางการคำนวณทางกลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid dynamics) ในภาพที่ 1 จะแสดงแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์สำหรับงานวิจัยนี้ [5]



ภาพที่ 1 แสดงแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์สำหรับชุดขดลวดของเครื่องทำความร้อน

สำหรับ อัตราการถ่ายเทความร้อน,  $\dot{Q}$  หาได้จาก

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) = \dot{m}_a C_p (T_2 - T_1) \quad (1)$$

โดยที่  $\dot{m}_a$  คืออัตราไหลของมวล h คือค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ที่จุดที่ 1 และ 2,  $C_p$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (Specific Heat),  $T$  คืออุณหภูมิที่จุดที่ 1 และ 2 ในงานวิจัยนี้ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดความร้อนกับน้ำ โดยพิจารณาสองรูปคือ แบบการนำความร้อน (Conduction) และการพาความร้อน (Convection) โดยการนำความร้อนหาได้จากกฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier's Law of Conduction) ดังนี้

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

โดยที่  $k$  คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity),  $A$  คือ พื้นที่ผิว,  $x$  คือระยะตามความหนาของแผ่นเรียบ สำหรับการไหลในการคำนวณจะใช้สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

โดยที่  $V_x, V_y, V_z$  เป็นองค์ประกอบของความเร็วของไหลตามแนวแกนต่างๆ ในระบบพิกัดฉาก  $\rho$  คือความหนาแน่นของของเหลว โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นจะคำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันและอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นต่อความดัน ดังนี้ [6]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4)$$

โดยที่  $P$  คือ ความดัน สำหรับในกรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นต่อความดันจะคำนวณจาก

$$\frac{d\rho}{dP} = \frac{1}{\beta} \quad (5)$$

โดยที่  $\beta$  คือโมดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk Modulus) ในการคำนวณนี้จะใช้ค่า  $\beta=10^{15}$  เพื่อให้คลื่นความดัน (Pressure Wave) เดินทางด้วยความเร็วเข้าใกล้อนันต์ตลอดทั้งโดเมนปัญหา นอกจากนี้ยังใช้สมการของนาวิเยร์-สโตคส์ (Navier-Stokes Equations) สำหรับโมเมนตัมในการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังนี้ [6]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} = \\ \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + T_x \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} = \\ \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) + T_y \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} = \\ \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + T_z \end{aligned} \quad (8)$$

โดยที่  $g_x, g_y, g_z$  คือความเร่งของของไหลในทิศทางต่างๆ  $\mu_e$  คือค่าความหนืดประสิทธิผลของของไหล ซึ่งในกรณีการไหลแบบเป็นชั้น (Laminar Flow) ค่าความหนืดประสิทธิผลจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนืดไดนามิกส์ (Dynamic Viscosity) ส่วนค่า  $R_x, R_y, R_z$  คือความต้านทานการแพร่กระจาย (Distributed Resistances) เนื่องมาจากรูปทรงของปัญหา เช่นการไหลในสสารรูพรุน (Porous Media) สำหรับ  $T_x, T_y, T_z$  คือการสูญเสียความหนืด (Viscosity Loss Term) ซึ่งกรณีการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ จะไม่นำตัวแปรนี้มาคำนวณ ส่วนสมการพลังงานสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้จะคำนวณจากสมการต่อไปนี้ [6]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_x C_p T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho V_y C_p T) \\ + \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_z C_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (9)$$

โดยที่  $k$  คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) และ  $Q_v$  คือแหล่งความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric Heat Source) สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาในภาวะชั่วขณะ (Transient) ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมตริกซ์ของเอลิเมนต์เริ่มต้นในสภาวะชั่วขณะ จะหาได้จาก

$$[A_e^{Transient}] = \int W^e \frac{\partial(\rho C_\phi \phi)^e}{\partial t} dV \quad (10)$$

โดยที่  $W^e$  คืองานที่ทำในเอลิเมนต์นั้นๆ ในการคำนวณแต่ละช่วงเวลาจะใช้การหาปริพันธ์แบบนิวมาร์ค (Newmark Time Integration) [6] ดังนี้

$$(\rho \phi)_n = (\rho \phi)_{n-1} + \Delta t \left( \delta \left( \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} \right)_n + (1-\delta) \left( \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} \right)_{n-1} \right) \quad (11)$$

โดยที่  $\delta$  คือค่าสัมประสิทธิ์ในการอินทิเกรต สำหรับในการคำนวณการไหลของความร้อน (Heat Flow) ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกรณีการนำและการพาความร้อน (Conduction and Convection) จะใช้สมการ ดังต่อไปนี้

$$\rho C \left( \frac{\partial T}{\partial t} + [V]^T [L] T \right) + [L]^T [q] = \ddot{q} \quad (12)$$

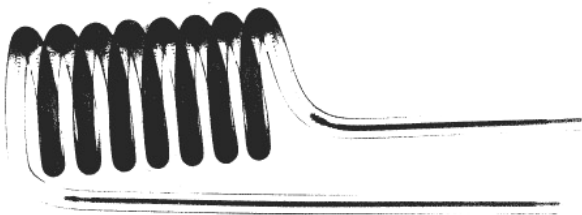
โดยที่  $C$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat),  $[V]$  คือเวกเตอร์ความเร็วในการถ่ายเทความร้อนของมวล,  $[L]$  คือเวกเตอร์โอเปอเรเตอร์,  $q$  คือ ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux),  $\ddot{q}$  คือ อัตราการผลิตความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

### 2.3 หลักการทำงานของเครื่องทำน้ำอุ่นแบบใช้ไฟฟ้า

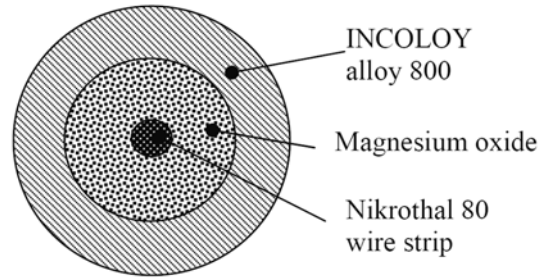


ภาพที่ 2 แสดงลักษณะและรายละเอียดภายในของเครื่องทำน้ำอุ่นขนาดกำลังไฟฟ้า 3 กิโลวัตต์

หลักในการทำงานของเครื่องทำน้ำอุ่นคือ การถ่ายเทความร้อนจากขดท่อความร้อนไปยังน้ำที่บรรจุอยู่ในถังเก็บ ดังนั้นในการวิจัยนี้จะทำการศึกษาและปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนของขดท่อความร้อนกับน้ำที่บรรจุอยู่ในถังเก็บน้ำเท่านั้น โดยจะถือว่าการทำงานของแผงวงจรควบคุมและอุปกรณ์อื่นๆ ทำงานได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ตามฟังก์ชันการใช้งานที่ได้ออกแบบแล้ว ภาพที่ 2 แสดงลักษณะของเครื่องทำน้ำอุ่นแบบใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในที่พักอาศัย และแสดงรายละเอียดภายในของเครื่องทำน้ำอุ่นขนาดกำลังไฟฟ้า 3 กิโลวัตต์



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของขดท่อความร้อน



ภาพที่ 4 แสดงลักษณะหน้าตัดของขดท่อความร้อน

การนำความร้อนของขดลวดความร้อนไปยังผิวด้านในของขดท่อความร้อน สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ [4]

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha_i \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right] + \frac{\alpha}{k_i} g_i(r, \phi, z, t) \quad (13)$$

โดยที่  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (Thermal Diffusivity)

$g_i(r, \phi, z, t)$  คือความร้อนจูลส์ (Joule Heat) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$g_i(r, \phi, z, t) = \begin{cases} \frac{I_{\max} \sin(2\pi\omega t)}{\sigma} & \text{if } r \leq r_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$I_{\max}$  คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด

$\omega$  คือ ความถี่ของกระแสไฟฟ้า [Hz]

$\sigma$  คือ ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

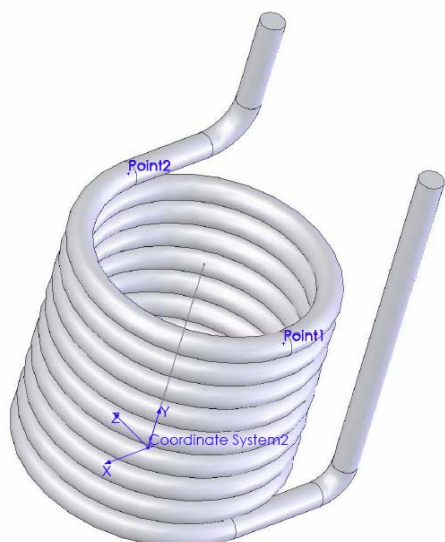
$i$  คือ ตัวห้อยแสดงค่าสมบัติต่างๆ ณ ตำแหน่งผิวด้านในของขดท่อความร้อน

$z$  คือ ระยะความยาวของขดลวดความร้อน

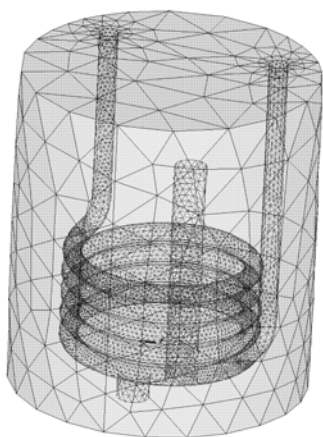
### 3. ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

สำหรับขั้นตอนดำเนินการวิจัยถูกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนการทดลอง เพื่อทำการวัดอุณหภูมิสูงสุดของน้ำอุ่นที่เครื่องสามารถผลิตได้ และการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis Package) เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างขดท่อความร้อนและน้ำและศึกษาลักษณะการไหลของน้ำในถังเก็บน้ำ

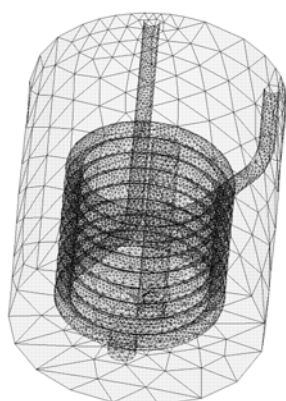
สำหรับส่วนของโมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะทำการศึกษาขดท่อความร้อนแบบ 8 ขด ตามแบบงานในภาพที่ 3 ซึ่งทางโรงงานได้ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และศึกษาขดท่อความร้อนแบบ 4 ขด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน ด้วยซอฟต์แวร์ Flotran CFD ใน ANSYS โดยกำหนดให้ระยะห่างของขดท่อความร้อน หรือระยะพิทช์ (Pitch) ของขดท่อความร้อนมีค่าเท่ากับคือ 9 มิลลิเมตร



ภาพที่ 5 แสดงแบบจำลองทรงตันของขดท่อความร้อน



ภาพที่ 6 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับขดท่อความร้อน  
แบบ 4 ขด



ภาพที่ 7 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับขดท่อความร้อน  
แบบ 8 ขด

#### 4. ผลการทดลอง

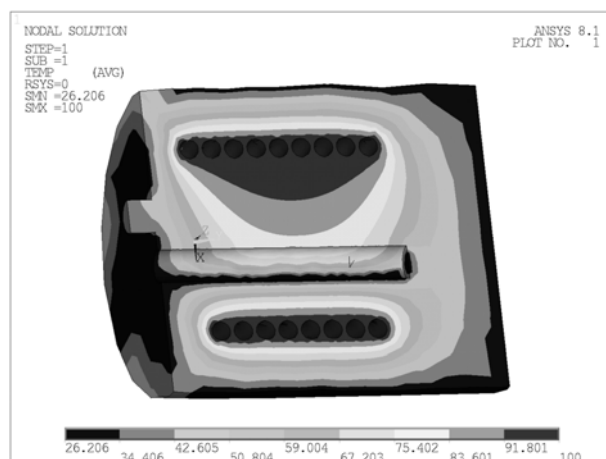
##### 4.1 ผลการวัดอุณหภูมิน้ำอุ่นจากเครื่องทำน้ำอุ่น

ตารางที่ 1 แสดงผลการวัดค่าอุณหภูมิน้ำอุ่นและเวลาที่ภาวะคงตัว

| ครั้งที่  | อุณหภูมิน้ำเข้า (°C) | อุณหภูมิน้ำอุ่น (°C) |
|-----------|----------------------|----------------------|
| 1         | 33                   | 45                   |
| 2         | 34                   | 46                   |
| 3         | 34                   | 46                   |
| 4         | 35                   | 45                   |
| 5         | 33                   | 45                   |
| 6         | 34                   | 45                   |
| 7         | 34                   | 45                   |
| 8         | 33                   | 45                   |
| 9         | 33                   | 45                   |
| 10        | 33                   | 46                   |
| ค่าเฉลี่ย | 33.6                 | 45.3                 |

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ภาวะคงตัวและที่ภาวะชั่วครู่

จากวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์บนแบบจำลองทรงตันขดท่อความร้อนจำนวน 4 ขด ได้ทำการกำหนดอัตราไหลของน้ำอยู่ที่ 12 ลิตรต่อนาที และ 470 ลิตรต่อนาที โดยจากผลการวิเคราะห์ทั้งแบบภาวะคงตัวและภาวะชั่วครู่พบว่า แบบจำลองดังกล่าว สามารถผลิตค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำอุ่นได้สูงสุดอยู่ที่ 7 องศาเซลเซียส ขณะที่ผลการวิเคราะห์บนแบบจำลองทรงตันขดท่อความร้อนจำนวน 8 ขด พบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถผลิตค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำอุ่นได้สูงสุดอยู่ที่ 12.2 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 8 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในปัญหาแบบภาวะคงตัว 8 ขด  
ที่อัตราไหล 12 ลิตร/นาที

#### 5. วิจัยรณผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า จำนวนขดท่อความร้อนแบบ 4 ขด สามารถผลิตน้ำอุ่นได้อุณหภูมิสูงสุดเพียง 37 °C ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) โดยประมาณเท่ากับ 7 °C ทั้งนี้

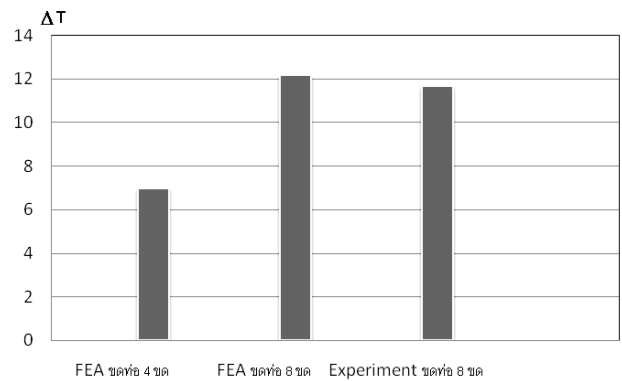
สาเหตุเนื่องจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมีไม่เพียงพอ ขณะที่จำนวนชุดท่อความร้อน 4 ชุด มีความสูงรวม 36.3 มิลลิเมตร แต่ท่อน้ำเข้ามีความสูง 120 มิลลิเมตร ซึ่งมากกว่าความสูงของชุดท่อถึง 3.3 เท่า จึงทำให้เกิดน้ำวนที่บริเวณท่อน้ำออกเป็นบริเวณกว้างมาก ส่งผลให้ความเร็วไหลของน้ำอยู่ในแกน y ซึ่งอยู่ในทิศทางที่น้ำไหลออกจากท่อน้อยกว่าความเร็วไหลของน้ำไหลเข้า 8-12 เท่า ในระหว่างภาวะชั่วคราว

สำหรับกรณีชุดท่อความร้อนแบบ 8 ชุด ผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถผลิตน้ำอุ่นได้อุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 42 °C ค่าความแตกต่างอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) โดยประมาณเท่ากับ 12 °C ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจริง ที่วัดค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยได้ประมาณ 11.7 °C เมื่อพิจารณาความสูงของชุดท่อความร้อน 8 ชุด พบว่ามีความสูง 80 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเกินครึ่งหนึ่งของความสูงถึงเกือบ 5 มิลลิเมตร และน้อยกว่าความสูงของท่อน้ำเข้าเพียงแค่ประมาณ 40 % ส่งผลให้น้ำวนที่เกิดขึ้นตรงบริเวณท่อน้ำออกแคบกว่ากรณีชุดท่อความร้อนแบบ 4 ชุด และด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความเร็วไหลของน้ำอุ่นสูงกว่ากรณีชุดท่อความร้อนแบบ 4 ชุด โดยมีอัตราส่วนระหว่างความเร็วไหลของน้ำเข้าต่อความเร็วไหลของน้ำออกประมาณ 1.7-2.4 เท่า ในการวิเคราะห์แบบภาวะชั่วคราว

## 6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าชุดท่อความร้อนจำนวน 4 ชุด มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนไม่เพียงพอที่จะผลิตอุณหภูมิที่อุ่นได้ตามที่ต้องการ อีกทั้งยังทำให้การไหลของน้ำอุ่นไม่ดี ดังนั้นจำนวนชุดท่อความร้อน 4 ชุด จึงไม่ใช่จำนวนที่เหมาะสมกับถังเก็บน้ำที่ใช้ ในการผลิตชุดท่อความร้อนโดยปกติจะให้จำนวนของชุดท่อความร้อนเป็นเลขคู่ ดังนั้นถัดจากจำนวน 4 ชุด ก็จะเป็น 6 ชุด ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วชุดท่อความร้อน 6 ชุด ก็ไม่น่าจะสามารถผลิตน้ำอุ่นตามอุณหภูมิที่ต้องการได้เช่นกัน ถ้าใช้วิธีการประมาณค่าแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation) จำนวนชุดท่อความร้อน 6 ชุด ก็น่าจะให้ความแตกต่างอุณหภูมิที่ 9.75 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าสมมติให้อุณหภูมิที่น้ำไหลเข้ามีค่า 30 องศาเซลเซียส ก็จะได้อุณหภูมิที่น้ำอุ่น 39.75 องศาเซลเซียส ซึ่งก็ยังต่ำกว่าอุณหภูมิที่ต้องการอยู่เล็กน้อย และถ้าเพื่อความแม่นยำแปรในกระบวนการผลิต จำนวนชุดท่อความร้อน 6 ชุด จึงเป็นจำนวนที่มีโอกาสอย่างสูงที่จะทำให้สินค้าไม่ผ่านการประกันคุณภาพ ดังนั้นจำนวนชุดท่อความร้อน 8 ชุด ตามที่ใช้อยู่ในการผลิตปัจจุบัน จึงน่าจะเป็นจำนวนที่เหมาะสมที่สุดแล้ว เพราะสามารถผลิตน้ำอุ่นได้สูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการได้ประมาณ 2 องศาเซลเซียส ถ้าเพิ่มชุดท่อความร้อนเป็น 10 ชุด ก็จะทำให้อุณหภูมิที่น้ำอุ่นที่ผลิตได้สูงเกินกว่าความต้องการ และยังเป็นภาระสิ้นเปลืองวัสดุ และต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าอีกด้วย ภาพที่ 9 เป็นแผนภูมิแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำอุ่นและน้ำไหลเข้าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จำนวนชุดท่อความร้อน 4 ชุด และ 8 ชุด เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ที่วัดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่จำนวนชุดท่อความร้อน 8 ชุด จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการทดลองพบว่าให้การประมาณค่าอุณหภูมิที่ผลิตได้ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถให้ผลคำตอบที่มี

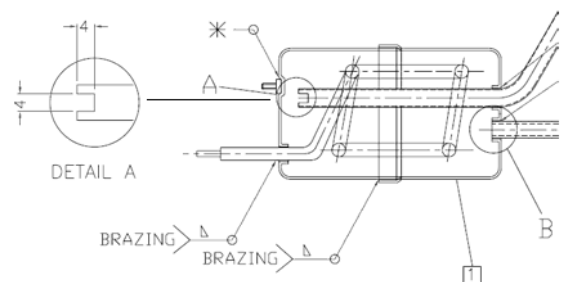
ความแม่นยำสูงถึง 95.9 % และนอกจากนี้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถประมาณเวลาที่ภาวะคงตัวได้แม่นยำถึง 92 %



ภาพที่ 9 แผนภูมิแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิจากน้ำอุ่นและน้ำไหลเข้า

## 7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์พบว่า เกิดน้ำวนขึ้นที่บริเวณใกล้กับท่อน้ำไหลเข้า ทำให้ความเร็วไหลของน้ำอุ่นที่ไหลออกลดลง เพื่อแก้ปัญหานี้ จึงทำการดัดแปลงปากทางออกของท่อน้ำเข้า โดยบากร่อง ตามแสดงในภาพที่ 10 เพื่อให้ให้น้ำที่ไหลออกตามร่องบากนี้ไปรบกวนการหมุนของน้ำวนแสดงขนาดของรอยบากที่ปากทางออกของท่อน้ำเข้า เพื่อแก้การเกิดน้ำวน ข้อเสนอแนะอีกประการหนึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ ก็คือ ถ้าใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สามารถบันทึกค่าได้ในแต่ละช่วงเวลาจะทำให้ผลการวิเคราะห์แม่นยำขึ้น และทำให้การออกแบบปรับปรุงเครื่องทำน้ำอุ่นสะดวกง่ายดายยิ่งขึ้น เช่น ระยะห่าง (Pitch) ของชุดท่อที่เหมาะสม ขนาดและความยาวของท่อน้ำเข้า/น้ำออก รวมทั้งการออกแบบวงจรควบคุมอุณหภูมิของหลอดความร้อนที่แม่นยำ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังพบว่าการเกิดน้ำวนส่งผลต่ออัตราไหลออกของน้ำอุ่น



ภาพที่ 10 แสดงขนาดของรอยบากที่ปากทางออกของท่อน้ำเข้าเพื่อแก้การเกิดน้ำวน

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ และกระทรวงศึกษาธิการ ที่ได้ให้โอกาสกับทางคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ นอกจากนี้คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างยิ่งต่อ บริษัท แอล ที เวอร์ค จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและตัวอย่าง

ขึ้นงานกับทางคณะผู้วิจัย รวมทั้งรองศาสตราจารย์ชาติ ตระการกุล ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะวิธีการทำงาน ตลอดทั้งโครงการวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

1. Hegazy, A. Adel and Diab, M.R. "Performance of an Improved Design for Storage-type Domestic Electrical Water-heaters." Applied Energy. 71(2002): 287-306.
2. Kar, A.K. and Al-Dossary, K.M. "Thermal Performances of Water Heaters in Series" Applied Energy. 52(1995): 47-53.
3. Dougherty, B.P. and Fanney A.H. "Thermal Performance of Residential Electric Water Heaters Subjected to Various Off-Peak Schedules." Journal of Solar Energy Engineering. 118 (1996) :73-80.
4. Hsiao, S.Y., Wei, P.S. and Wang, Z.P. "Three-dimensional Temperature Field in a Line-heater Embedded by a Spiral Electric Resistor." Applied Thermal Engineering. 26(2006) :917-925.
5. Kreith, F. Handbook of Thermal Engineering : CRC Press LLC, USA, 2000
6. ANSYS Theory References : ANSYS Inc., USA, 2004.