

การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด Analysis of Factors that Affect Thermal Efficiency of an Infrared Gas Stove

อภิสรรา เจริญเลิศจรรยา¹, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช² และ พรทิพย์ แก่งอินทร์^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: pornthip.kea@mahidol.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-2889-2138 ต่อ 6401-3, เบอร์โทรสาร 0-2889-2138 ต่อ 6429

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด รามิเตอร์ที่ศึกษาจะประกอบด้วยอุณหภูมิของหัวเตา ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ และขนาดของหัวเตา โดยการศึกษาด้วยวิธีการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์จะถูกเปรียบเทียบกับความถูกต้องด้วยวิธีการทดลอง ซึ่งวิธีการทดสอบจะอ้างอิงจากมาตรฐานการทดสอบเตาก๊าซความดันต่ำตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเตาหุงต้มในครัวเรือนใช้กับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (มอก. เลขที่ 2312-2549) ผลการศึกษาพบว่าผลจากวิธีการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์จะมีความสอดคล้องกับผลจากการทดลอง โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 5.994 % พบว่าเมื่ออุณหภูมิของหัวเตาสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของน้ำและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น และเมื่อระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้หัวเตาที่มีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของน้ำและค่าประสิทธิภาพความร้อนสูงขึ้น โดยผลการศึกษาจะสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาและวิเคราะห์หารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด และเป็นแนวทางการใช้งานเตาแก๊สอินฟราเรดให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและช่วยประหยัดพลังงานได้

คำหลัก: การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ ; การกระจายตัวอุณหภูมิ ; เตาแก๊สอินฟราเรด ; ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน

Abstract

This work studies the parameters that effect on the temperature distribution and thermal efficiency of the infrared gas stove. The various parameters consist of the temperature of the burners, the distance between the burners and the boiling pot of water and the size of the burners are investigated. The computer simulation study is validated with an experimental study. The test method is reference from the low pressure gas burner in households with LPG test (TIS No. 2312-2549). The results show that the computer simulation results are in agreement with the experimental data. There are 5.994 average percent errors. Moreover, the results found that the higher temperature of the burners resulted in increasing water temperature and increasing thermal efficiency. The higher distance

between burner and the boiling pot of water resulted in increasing water temperature and increasing thermal efficiency. Likewise, the higher size of burner will make the water temperature and thermal efficiency increases. The result of this study can be the basis for study and analyze of the parameters that effect on the thermal efficiency of the infrared burners and find the best way to achieve maximum efficiency and save energy.

Keywords: Computer Simulation; Temperature Distribution; Infrared Gas Stove; Thermal Efficiency

1. บทนำ

จากข้อมูลของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานพบว่าการใช้แก๊สแอลพีจี [1] และราคาแก๊สแอลพีจี [2] ในประเทศไทยปี พ.ศ. 2550 - 2558 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกๆปี จากปัญหาวิกฤตด้านพลังงานข้างต้นจะส่งผลกระทบต่อทั้งภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อการใช้อุปกรณ์ประเภทต่างๆ ที่ใช้แก๊สแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งถ้าสามารถใช้อุปกรณ์ประเภทต่างๆ นี้ให้มีประสิทธิภาพและให้ความร้อนสูงสุดโดยใช้เวลาและเชื้อเพลิงน้อยกว่า จะสามารถเป็นแนวทางการใช้ทรัพยากรแก๊สให้เกิดประโยชน์สูงสุด อันเป็นหนทางช่วยประหยัดพลังงานได้ทางหนึ่ง

เตาแก๊สอินฟราเรด (Infrared Gas Stove) จัดเป็นเตาแก๊สความดันต่ำประเภทหนึ่ง โดยหลักการทำงานจะอาศัยการส่งผ่านความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Radiation) จากการสำรวจตลาดเตาแก๊สอินฟราเรดในประเทศไทยพบว่าเตาแก๊สอินฟราเรดที่จัดจำหน่ายอยู่ในประเทศไทยทั้งหมดนั้นมีตัวปล่อยรังสีประเภทเดียวคือ ตัวปล่อยรังสีประเภทใช้แก๊สแบบแผ่นความร้อนเซรามิก (Ceramic Burner) ปัจจุบันเตาแก๊สอินฟราเรดกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นในภาคครัวเรือน เนื่องจากเตาแก๊สอินฟราเรดจะมีลักษณะเป็นเตาแก๊สแรงดันต่ำชนิดไม่มีเปลวไฟ มีข้อดีคือสามารถลดการสิ้นเปลืองของแก๊สสูงต้มได้มากกว่าเตาสูงต้มแบบเดิม ลักษณะการเผาไหม้ไม่มีควัน จึงมีรูปลักษณะการใช้งานที่ดูสะอาด จากผลการสำรวจผู้ประกอบการผลิตเตาแก๊สอินฟราเรดพบว่าปริมาณการจำหน่ายต่อปี

ของผู้ประกอบการทั้งหมดในประเทศไทยอยู่ที่ 430,000 เตาต่อปี [3] เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณการจำหน่ายของเตาแก๊สอินฟราเรดกับเตาแก๊สความดันต่ำที่ใช้งานโดยทั่วไปพบว่ามีส่วนร้อยละ 26 และร้อยละ 74 ตามลำดับ [3] และพบว่าโดยเฉลี่ยยอดจำหน่ายเตาแก๊สอินฟราเรดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 14 จากยอดขายทั้งหมดเมื่อเทียบกับสองปีก่อนหน้า แสดงให้เห็นว่าประชาชนมีแนวโน้มหันมาให้ความสนใจเลือกซื้อและใช้เตาแก๊สอินฟราเรดเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นเตาแก๊สอินฟราเรดยังเป็นอุปกรณ์อีกประเภทหนึ่งที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ส่งเสริมในการกำหนดระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงานเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานอีกด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาที่มุ่งเน้นเกี่ยวกับทางด้านปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สที่ใช้ในครัวเรือน อาทิ งานวิจัยของ Pantangi V.K. และคณะ [4] และ Muthukumar P. และ Shyamkumar P.I. [5] ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สแบบทั่วไปและเตาแก๊สแบบวัสดุพอร์ซัน จากการศึกษาพบว่าเตาแก๊สแบบวัสดุพอร์ซันมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่าเตาแก๊สแบบทั่วไป นอกจากนั้นยังม้งานวิจัยบางส่วนที่ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊ส อาทิ งานวิจัยของ Jugjai S. และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของเปลวไฟที่ส่งผลต่อการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊ส จากการศึกษา

พบว่ารูปร่างเปลวไฟที่มีลักษณะหมุนวนเข้าสู่ศูนย์กลาง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเตาแก๊สแบบธรรมดา ต่อมา Khan M.Y. และ Saxena A. [7] ได้ทำการศึกษาลักษณะของหัวเตาที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน จากการศึกษาพบว่าหัวเตาทองเหลืองแบบหน้าแบนให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าหัวเตาทองเหลืองแบบธรรมดาและหัวเตาทองเหลืองแบบหน้าดอกไม้ งานวิจัยโดย Hou S.S. และ Chou C.H. [8] ทำการศึกษาลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและระดับความสูงของวัสดุที่นำมาเผาไหม้ ผลการศึกษาพบว่าวัสดุที่มีความสูงระหว่าง 2-3 เซนติเมตร มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่องศาแก๊สออก 15 องศา โดยปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าล้วนส่งผลต่อการเพิ่มของการถ่ายเทความร้อนและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊ส อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่างานศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเตาแก๊สอินฟราเรด ทั้งในประเทศและต่างประเทศยังมีอยู่จำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับงานศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวข้องผลิตภัณฑ์อื่นที่ใช้เทคโนโลยีรังสีอินฟราเรดเหมือนกัน นอกจากนี้ข้อกำหนดทางวิชาการของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) หรือมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่กล่าวถึงการหาค่าประสิทธิภาพของเตาแก๊สอินฟราเรดนั้นก็ยังไม่ได้มีการระบุไว้อย่างชัดเจน รวมทั้งการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของเตาแก๊สอินฟราเรดที่อาจส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดก็ยังพบว่ามีจำนวนอยู่ไม่มากนัก

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อนและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิของหัวเตา ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ และขนาดของหัวเตา โดยทำการศึกษาจาก

การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์และเปรียบเทียบความถูกต้องจากการทดลอง ซึ่งเงื่อนไข วิธีการทดสอบ มาตรฐานการทดสอบ และสมการที่ใช้ในการทดลองอ้างอิงจากการทดสอบเตาแก๊สความดันต่ำตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเตาหุงต้มในครัวเรือนใช้กับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (มอก. เลขที่ 2312-2549) และอ้างอิงจากโครงการศึกษาจัดทำมาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานเตาแก๊สอินฟราเรด [3] ในการวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและทำการทดลอง โดยผลการศึกษาที่ได้จะสามารถเป็นพื้นฐานในการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด เพื่อเป็นแนวทางในการใช้อุปกรณ์ประเภทต่างๆ ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อนำไปสู่แนวทางในการช่วยประหยัดพลังงานได้ทางหนึ่ง

2. การทดลอง

2.1 วิธีการทดลอง

วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด จะอ้างอิงจากการทดสอบเตาแก๊สความดันต่ำตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเตาหุงต้มในครัวเรือนใช้กับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (มอก. เลขที่ 2312-2549) [3] โดยการทดสอบจะเริ่มต้นจากการตรวจสอบและเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ ติดตั้งอุปกรณ์หัวเตาแก๊สที่ใช้ในการทดสอบ และต่อเตาแก๊สเข้ากับมาตรปริมาตรแก๊ส มาตรความดันแก๊ส อุปกรณ์ปรับความดันแก๊ส มาตรอุณหภูมิแก๊ส และแหล่งจ่ายแก๊สดังแสดงในรูปที่ 1 และเริ่มทำการทดสอบโดยการจุดเตาแก๊ส ทำการปรับวาล์วแก๊สไปที่ตำแหน่งการจ่ายแก๊สสูงสุดที่ความดันแก๊สทดสอบ 280 มิลลิเมตรน้ำ [3] โดยแก๊สที่ใช้ในการทำทดลองคือแก๊สโพรเพน 100 เปอร์เซ็นต์ [3] ทำการจุดเตาเป็นเวลา 5 นาที เพื่อขจัดสีคราบน้ำมัน หรือสิ่งที่เคลือบหัวเตาแก๊ส แล้วปิดเตาแก๊ส นำภาชนะทดสอบอะลูมิเนียมขนาด 240 มิลลิเมตร [3] ซึ่งใส่น้ำปริมาณ 3.5 กิโลกรัม [3] พร้อมฝาปิดและนำไป

ตั้งบนเตาแก๊ส โดยน้ำที่ใช้ในการทดสอบมีอุณหภูมิเริ่มต้น 25±2 องศาเซลเซียส [3] ใส่เทอร์โมมิเตอร์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของภาชนะทดสอบเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำ ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิน้ำและอุณหภูมิแก๊สทดสอบขณะเริ่มต้นทดสอบ ทำการต้มน้ำจนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส และทำการปิดเตาแก๊ส บันทึกค่าอุณหภูมิสูงสุดของน้ำ และปริมาณการใช้แก๊ส ทำการทดสอบซ้ำจำนวน 5 รอบ จากนั้นนำค่าที่บันทึกได้ไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน และวิเคราะห์ผลการทดสอบ ก่อนทำการทดสอบซ้ำทุกรอบต้องทำการขัดภาชนะทดสอบให้สะอาด เพื่อลดการสูญเสียประสิทธิภาพในการนำความร้อนของภาชนะทดสอบ และทำการเปลี่ยนน้ำให้มีอุณหภูมิเริ่มต้น 25±2 องศาเซลเซียส โดยรูปที่ 2 จะแสดงการทดสอบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดในการศึกษา

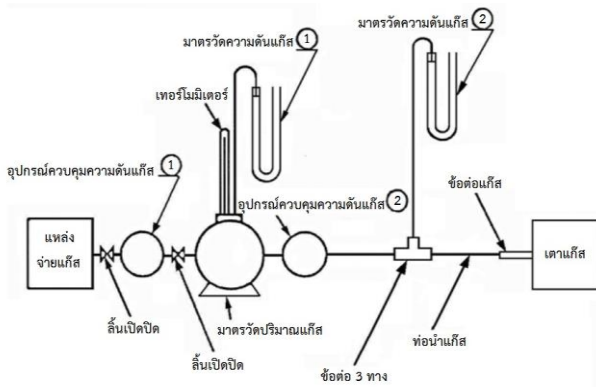


รูปที่ 2 การทดสอบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด

2.2 การหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน

การคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดจะอ้างอิงตามสูตรการคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเตาหุงต้มในครัวเรือนใช้กับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (มอก. เลขที่ 2312-2549) [3] ดังสมการต่อไปนี้

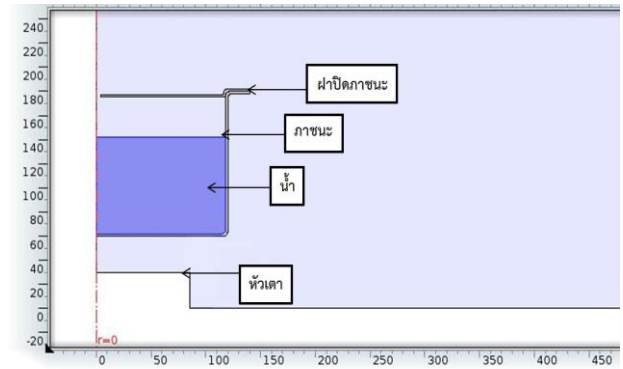
$$\eta = \frac{m \times c \times (T_2 - T_1)}{V \times Q} \times \frac{273 + T_g}{298} \times \frac{101.3}{P_s - P_m - P_{sat}} \times 100\% \quad (1)$$



รูปที่ 1 แผนภูมิชุดทดสอบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด [3]

- เมื่อ m คือมวลน้ำที่ใช้ทดสอบซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.5 (กิโลกรัม)
- c คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำที่ใช้ทดสอบซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.004186 (เมกะจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน)
- T_1 คืออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (องศาเซลเซียส)
- T_2 คืออุณหภูมิสุดท้ายของน้ำ (องศาเซลเซียส)
- V คือปริมาณแก๊สที่ใช้ทดสอบ (ลูกบาศก์เมตร)
- Q คือค่าความร้อนต่ำของแก๊สที่ใช้ทดสอบซึ่งมีค่าเท่ากับ 107.86 (เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ความดัน 101.3 กิโลพาสคัล และ

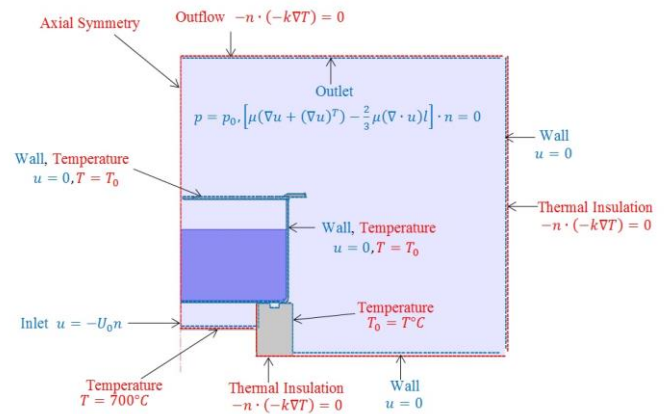
- อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานของ มอก. เลขที่ 450-2528
- T_g คืออุณหภูมิของแก๊สทดสอบในมาตรวัดปริมาณแก๊ส (องศาเซลเซียส)
- P_s คือความดันบรรยากาศในขณะทดสอบ (กิโลพาสคัล)
- P_m คือความดันแก๊สทดสอบในมาตรวัดปริมาณแก๊ส (กิโลพาสคัล)
- P_{sat} คือความดันของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_g องศาเซลเซียส (กิโลพาสคัล)



รูปที่ 3 แบบจำลองสมมาตรรอบแกนที่ใช้วิเคราะห์โปรแกรมเชิงคอมพิวเตอร์

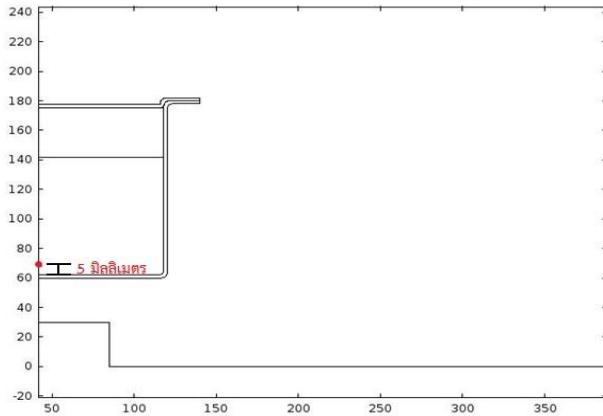
3. การจำลองโปรแกรมเชิงคอมพิวเตอร์

การจำลองโปรแกรมเชิงคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้อยู่บนสมมติฐานที่ไม่พิจารณากระบวนการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง โดยจะพิจารณาตั้งแต่กระบวนการให้ความร้อนแก่ภาชนะเมื่อได้รับความร้อนจากเตาแก๊สอินฟราเรดเท่านั้น สมการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในโปรแกรมเชิงคอมพิวเตอร์ถูกแก้ปัญหผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ผ่านโปรแกรม COMSOL™ Multiphysics และเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมเชิงคอมพิวเตอร์กับผลจากการทดลอง ดังนั้นแบบจำลองของเตาแก๊สอินฟราเรด แบบจำลองขนาดของภาชนะหรือหม้อทดสอบ และแบบจำลองของมวลน้ำทดสอบ จะมีขนาดสอดคล้องกับการทดลองและมีขนาดสม่ำเสมอ และสมมติให้ภาชนะตั้งในตำแหน่งกึ่งกลางของเตาแก๊ส ด้วยสมมติฐานข้างต้นนี้จึงพิจารณาแบบจำลองในการวิเคราะห์แบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Coordinate) ในการแก้ปัญหา โดยแบบจำลองสมมาตรรอบแกนที่ใช้ในศึกษาจะแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 4 เงื่อนไขขอบเขตของการศึกษา

และแบบจำลองที่ใช้ในศึกษาจะได้รับเงื่อนไขเช่นเดียวกันกับการทดลอง โดยเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์จะแสดงดังรูปที่ 4 โดยจะสมมติให้น้ำในภาชนะได้รับความร้อนจากเปลวไฟจากเตาแก๊สอินฟราเรดที่มีค่าอุณหภูมิคงที่และสม่ำเสมอ และตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของน้ำจะสอดคล้องกับตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของน้ำในการทดลอง โดยตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของน้ำจะวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของภาชนะและมีระยะห่างจากก้นภาชนะ 5 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของน้ำ (ระยะความลึก 5 มิลลิเมตร จากก้นภาชนะ)

3.1 สมการที่ใช้ในการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์

ในการวิเคราะห์การกระจายตัวอุณหภูมิของน้ำภายในภาชนะ จะได้จากการวิเคราะห์สมการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาเมื่อพิจารณาการไหลของน้ำที่ค่าความเร็วคงที่คือ:

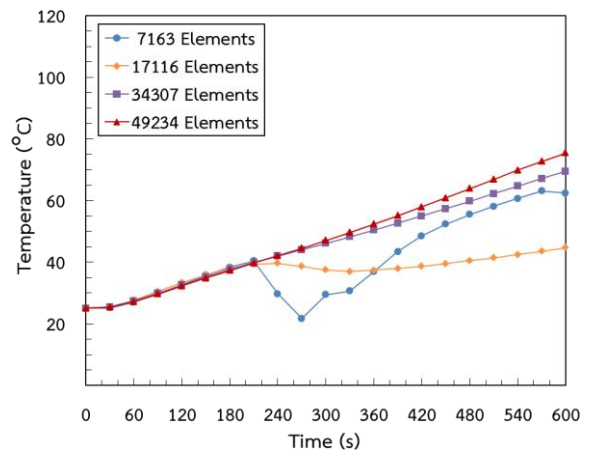
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2)$$

- เมื่อ T คืออุณหภูมิของน้ำ (องศาเซลเซียส)
- ρ คือค่าความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (จุลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส)
- k คือค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรองศาเซลเซียส)
- u คือความเร็วของน้ำในขณะทดสอบซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 (เมตรต่อวินาที)

3.2 การจำลองเชิงตัวเลข

สมการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาจะถูกแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method (FEM)) ผ่านโปรแกรม COMSOL™

Multiphysics เพื่อศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิของน้ำที่เกิดขึ้นภายในภาชนะ เมื่อได้รับการทำความร้อนจากเตาแก๊สอินฟราเรด โดยได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของจำนวนเอลิเมนต์เพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการคำนวณและเพื่อความแม่นยำของผลการคำนวณ เพื่อนำไปศึกษาในพารามิเตอร์อื่นๆ โดยทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางของภาชนะและมีระยะห่างจากก้นภาชนะ 5 มิลลิเมตร ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนตามจำนวนเอลิเมนต์ โดยใช้อุณหภูมิหัวเตา 700 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ 30 มิลลิเมตร และขนาดของหัวเตา 170 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 6 จากรูปพบว่าค่าอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้จำนวนเอลิเมนต์ 34,307 เอลิเมนต์ มีความแตกต่างของค่าอุณหภูมิของน้ำจากการใช้จำนวนเอลิเมนต์จำนวน 49,234 เอลิเมนต์โดยเฉลี่ยน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ จึงใช้จำนวนเอลิเมนต์ 34,307 เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ในการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาหาอิทธิพลของพารามิเตอร์อื่นๆ ต่อไป โดยค่าคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) ของน้ำ ภาชนะต้มน้ำอะลูมิเนียมและอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนเอลิเมนต์ ที่อุณหภูมิหัวเตา 700

ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ 30 มิลลิเมตร และ
ขนาดของหัวเตา 170 มิลลิเมตร
ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำ ภาชนะต้มน้ำ
อะลูมิเนียม และอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์

ชนิดของวัสดุ	ค่าความหนาแน่น ρ (kg/m ³)	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ c_p (J/kg.K)	ค่าการนำความร้อน k (W/m.K)
น้ำ	1000	4187	0.58
ภาชนะต้มน้ำอะลูมิเนียม	2700	900	201
อากาศ	1.2	1020	0.026

4. ผลและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิของน้ำภายในภาชนะต้มน้ำ และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด รวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 50 องศาเซลเซียส (จากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียส) โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาจะประกอบด้วยอุณหภูมิของหัวเตา (ค่าอุณหภูมิ T = 650 องศาเซลเซียส 700 องศาเซลเซียส และ 750 องศาเซลเซียส) ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ (ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ L = 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร และ 40 มิลลิเมตร) และขนาดของหัวเตา (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเตา D = 170 มิลลิเมตร 240 มิลลิเมตร และ 290 มิลลิเมตร) ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาจะนำเสนอในส่วนถัดไป

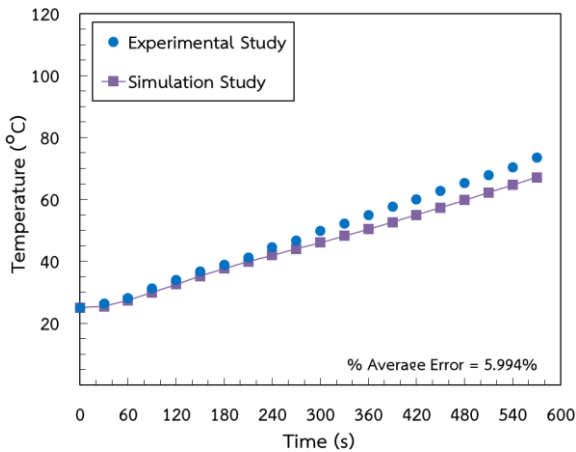
เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมเชิงคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงทำการทดลองเก็บข้อมูลของค่าอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการทดลองจริงในการต้มน้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 50 องศาเซลเซียสโดยใช้การทำความร้อนด้วยเตาแก๊สอินฟราเรด และทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำที่บริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของภาชนะต้มน้ำ นำค่าอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนตามเวลาไปทำการ

เปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการใช้การจำลองเชิงตัวเลขอินฟราเรด โดยใช้อุณหภูมิหัวเตาที่ 700 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะที่ 30 มิลลิเมตร และขนาดของหัวเตาที่ 170 มิลลิเมตร โดยกราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของน้ำที่ได้จากการทดลองและจากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 7 จากรูปจะพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่น้ำเพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิของน้ำทั้งจากการทดลองและจากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และพบว่าผลที่ได้จากการใช้การจำลองเชิงตัวเลขและผลที่ได้จากการทดลองจะมีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจากการทดลองคือ 5.994 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์และวิธีการจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้จึงมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ในการศึกษาในส่วนอื่นๆ ต่อไป

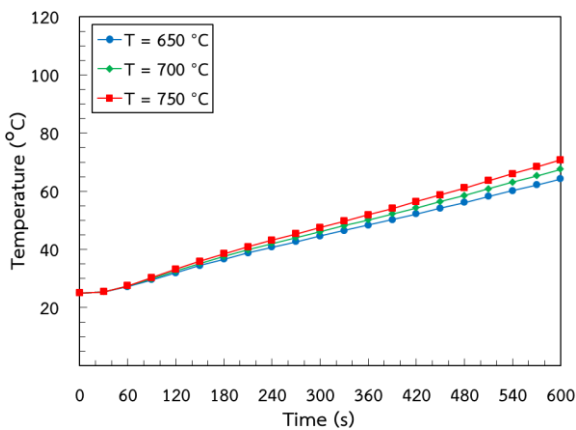
การศึกษาค่าอิทธิพลของอุณหภูมิของหัวเตาต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำจากการใช้การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์จะแสดงในรูปที่ 8 โดยค่าอุณหภูมิของหัวเตาที่ทำการศึกษาจะประกอบด้วยค่าอุณหภูมิ T = 650 องศาเซลเซียส 700 องศาเซลเซียส และ 750 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ 30 มิลลิเมตรและขนาดของหัวเตาเป็น 170 มิลลิเมตรที่ระยะเวลาการให้ความร้อนเวลา 600 วินาที โดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของหัวเตา ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของภาชนะและมีระยะห่างจากกันภาชนะ 5 มิลลิเมตร จากรูปที่ 8 จะพบว่าค่าอุณหภูมิของน้ำในแต่ละค่าอุณหภูมิของหัวเตาที่เปลี่ยนแปลงจะมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน คืออุณหภูมิของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิของหัวเตาต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของหัวเตาเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิของหัวเตาที่สูงจะให้พลังงาน



ความร้อนแต่น้ำสูงขึ้นและส่งผลให้ค่าอุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง และจากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์



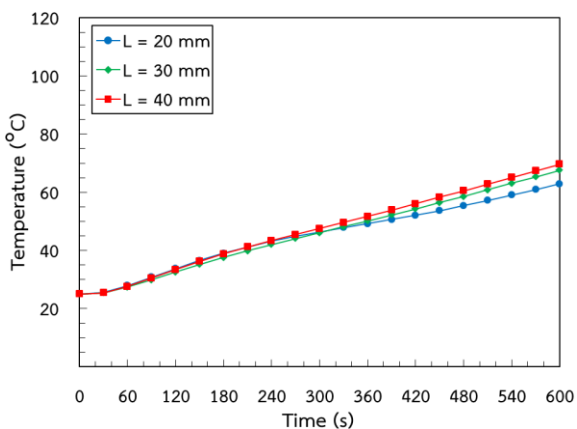
รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่อุณหภูมิของหัวเตาค่าต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ 30 มิลลิเมตรและขนาดของหัวเตาเป็น 170 มิลลิเมตร

การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำจากการใช้การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์จะแสดงในรูปที่ 9 โดยระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะที่เปลี่ยนแปลงที่ทำการศึกษาก็ประกอบด้วยระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ L = 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร และ 40

มิลลิเมตรตามลำดับ โดยใช้ค่าอุณหภูมิของหัวเตาที่ 700 องศาเซลเซียสและขนาดของหัวเตาเป็น 170 มิลลิเมตรที่ระยะเวลาการให้ความร้อนเวลา 600 วินาที โดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของภาชนะและ ตำแหน่งที่ระดับน้ำสูงกว่าก้นภาชนะ 5 มิลลิเมตร จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิของน้ำในแต่ละระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะที่เปลี่ยนแปลงจะมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันคืออุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำจะพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะเพิ่มขึ้นจะทำให้ก้นภาชนะได้รับพลังงานความร้อนที่มากกว่าระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะที่ลดลงจึงส่งผลให้ค่าอุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 10 โดยรูปที่ 10 จะแสดงรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิ (Temperature Profile) ที่ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ L = 20 มิลลิเมตร 30 มิลลิเมตร และ 40 มิลลิเมตรตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะที่ลดลงจะส่งผลให้มีพลังงานความร้อนบางส่วนสูญเสียออกด้านนอกของก้นภาชนะ จึงส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทไปยังน้ำในภาชนะมีค่าลดลงและส่งผลให้ค่าอุณหภูมิของน้ำมีค่าลดลง

ส่วนสุดท้ายนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดของหัวเตาต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำจากการใช้การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ โดยขนาดของหัวเตาที่เปลี่ยนแปลงที่ทำการศึกษาก็ประกอบด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเตา D = 170 มิลลิเมตร 240 มิลลิเมตร และ 290 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยใช้ค่าอุณหภูมิของหัวเตาที่ 700 องศาเซลเซียสและระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ 30 มิลลิเมตรที่ระยะเวลาการ

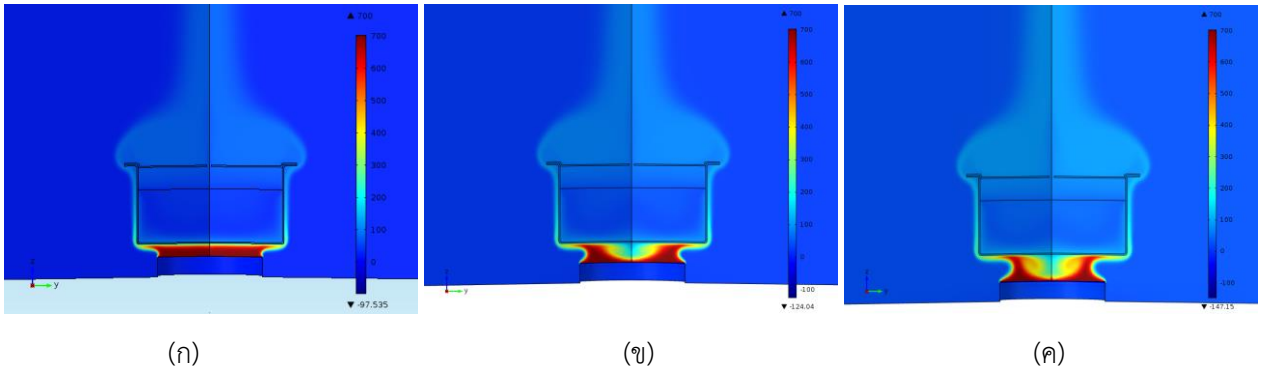
ให้ความร้อนเวลา 600 วินาที โดยกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่เปลี่ยนตามขนาดของหัวเตา ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของภาชนะและ และตำแหน่งที่ระดับน้ำสูงกว่าก้นภาชนะ 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 11 จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิของน้ำในแต่ละขนาดของหัวเตาที่เปลี่ยนแปลงจะมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันคืออุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของขนาดของหัวเตาต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำจะพบว่าเมื่อขนาดของหัวเตาเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น



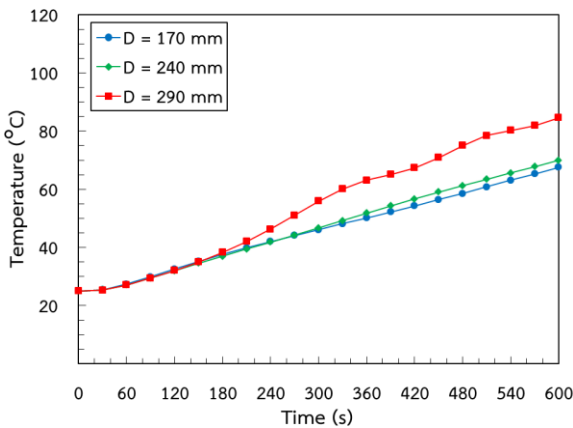
รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะต่างๆ ที่อุณหภูมิของหัวเตา 700 องศาเซลเซียส และขนาดของหัวเตาเป็น 170 มิลลิเมตร

ในตารางที่ 2 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหัวเตา ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ และขนาดหัวเตา กับระยะเวลาที่ใช้ในการต้มจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียส และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด โดยการคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดจะใช้ค่ามวลของน้ำ 3.5 กิโลกรัม ค่าอุณหภูมิของก๊าซทดสอบ 27.9 องศาเซลเซียส ค่าความดันบรรยากาศในขณะทดสอบ 103.4 กิโลพาสคัล ค่าความดันของก๊าซทดสอบ 2.74 กิโลพาสคัล และค่าความดันของไอน้ำอิ่มตัวที่

อุณหภูมิ T_g องศาเซลเซียส 3.74358 กิโลพาสคัล ที่เท่ากันในทุกกรณี ส่วนค่าปริมาณของแก๊สจะคำนวณตามเวลาที่ได้จากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ซึ่งได้จากการประมาณค่าโดยเทียบจากการคำนวณของแก๊สที่ใช้ในการทดสอบจริง และใช้สูตรการคำนวณเพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเตาหุงต้มในครัวเรือนใช้กับกาชปโตรเลียมเหลว (มอก. เลขที่ 2312-2549) [3] ดังสมการที่ (1) จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียส จะแปรผกผันกับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิหัวเตากับระยะเวลาที่ใช้ในการต้มจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียส จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิหัวเตาเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาในการต้มน้ำลดลง และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในรูปที่ 8 คือเมื่ออุณหภูมิหัวเตาเพิ่มสูงขึ้นจะให้พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเร็วขึ้น ระยะเวลาในการต้มน้ำลดลง และส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้จะมีความสอดคล้องกันกับอิทธิพลของระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะและอิทธิพลของขนาดของหัวเตา โดยเมื่อระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะเพิ่มขึ้นจะให้พลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเร็วขึ้น (สอดคล้องกับผลในรูปที่ 9) ส่งผลให้ระยะเวลาในการต้มน้ำลดลง และส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อขนาดของหัวเตาเพิ่มขึ้นจะเป็นการให้พลังงานความร้อนแก่ภาชนะที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเร็วขึ้น (สอดคล้องกับผลในรูปที่ 11) ส่งผลให้ระยะเวลาในการต้มน้ำลดลง และส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดจะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 10 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิ (Temperature Profile) ที่อุณหภูมิหัวเตา 700 องศาเซลเซียส และขนาดของหัวเตาเป็น 170 มิลลิเมตรที่ระยะเวลาการให้ความร้อนเวลา 600 วินาที ที่ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ (ก) 20 มิลลิเมตร (ข) 30 มิลลิเมตร และ (ค) 40 มิลลิเมตร



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่หัวเตาขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิของหัวเตา 700 องศาเซลเซียส และที่ระยะห่างระหว่างหัวเตา 30 มิลลิเมตร

5. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการให้ความร้อนแก่น้ำโดยใช้เตาแก๊สอินฟราเรด โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษาจะประกอบด้วย อุณหภูมิของหัวเตา ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ และขนาดของหัวเตา โดยทำการเปรียบเทียบผลการที่ได้จากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์กับผลจากการทดลอง ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิของหัวเตาสูงขึ้นจะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนไปยังภาชนะและน้ำที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ใช้

ระยะเวลาในการต้มน้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียสลดลง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะสูงขึ้นจะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนไปยังภาชนะและน้ำที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ใช้ระยะเวลาในการต้มน้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียสลดลง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าและเมื่อขนาดของหัวเตาสูงขึ้นจะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนไปยังภาชนะและน้ำที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ใช้ระยะเวลาในการต้มน้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียสลดลง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรดเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยและคณะขอขอบคุณสถานที่ที่ทำวิจัยภายใต้โครงการศูนย์วิจัยและปฏิบัติการทดสอบพลังงานภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล



7. เอกสารอ้างอิง

[1] Aroonjarattham, P. (2016). The Parametric Studied of High Pressure Gas Burner Affect Thermal Efficiency, *Engineering Journal*, vol. 20, August 2016, pp. 33-48.

[2] The Energy Policy and Planning Office (2016). Energy Statistics of Thailand 2016, pp. 36.

[3] รายงานฉบับสุดท้าย (Final report) โครงการศึกษาจัดทำมาตรฐานประสิทธิภาพพลังงานเตารังสีอินฟราเรด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

[4] Pantangi, V.K., Mishra, S.C., Muthukumar, P. and Reddy, R. (2011). Studies on Porous Radiant Burners for LPG (Liquefied Petroleum Gas) Cooking Applications, *Energy*, vol. 36, September 2011, pp. 6074-6080.

[5] Muthukumar, P. and Shyamkumar, P.I. (2013). Development of Novel Porous Radiant Burners

for LPG Cooking Application, *Fuel*, vol. 112, October 2013, pp. 562-566.

[6] Jugjai, S., Tia, S. and Trewetaskorn, W. (2001). Thermal Efficiency Improvement of an LPG Gas Cooker by a Swirling Central Flame, *International Journal or Energy Research*, vol. 25(8), May 2001, pp. 657-674.

[7] Khan, M.Y. and Saxena, A. (2013). Performance of LPG Cooking Stove Using Different Design of Burner Heads, *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, July 2013, pp. 656-659.

[8] Hou, S.S. and Chou, C.H. (2013). Parametric Study of High-Efficiency and Low-Emission Gas Burners, Hindawi Publishing Corporation, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, October 2013, pp. 1-7.

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหัวเตา ระยะห่างระหว่างหัวเตาและภาชนะ และขนาดหัวเตา กับระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนน้ำให้เพิ่มขึ้น 50 องศาเซลเซียส และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สอินฟราเรด

กรณีศึกษา	อุณหภูมิหัวเตา (T : องศาเซลเซียส)	ระยะห่างระหว่างหัวเตา และภาชนะ (L : มิลลิเมตร)	ขนาดหัวเตา (D : มิลลิเมตร)	เวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ (Time : วินาที)	ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน (η : เปอร์เซ็นต์)
Case 1	650	30	170	764.261	27.95425
Case 2	700	30	170	701.147	31.29731
Case 3	750	30	170	653.071	32.69362
Case 4	700	20	170	784.997	31.29731
Case 5	700	30	170	701.147	32.83412
Case 6	700	40	170	671.202	45.73825
Case 7	700	30	170	701.147	28.71272
Case 8	700	30	240	668.329	31.29731
Case 9	700	30	290	479.774	33.60127