

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ A development of spreadsheet program for heat surface calculation in fire-tube boiler

นนท์ปวิธ คลังหิรัญ¹, จารุวัตร เจริญสุข*

¹สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10520

*ติดต่อ: โทรศัพท์ : 023 264 197, โทรสาร : 023 264 198, E-mail : kcjaruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโปรแกรมแบบสเปรดชีตที่พัฒนาขึ้นสำหรับคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ โดยค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ จะสัมพันธ์กับการกำหนดพารามิเตอร์ในการออกแบบ เช่น ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางท่อไฟใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนท่อไฟเล็ก และกำลังการผลิตของไอน้ำที่ต้องการ เป็นต้น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใช้วิธีการคำนวณตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้ 1.วิเคราะห์แยกธาตุของเชื้อเพลิงในการบวนการเผาไหม้เพื่อหาคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย 2. ใช้ทฤษฎีการเผาไหม้ เพื่อคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณไอเสียที่ผ่านชุดท่อไฟ 3. ใช้ทฤษฎีการนำ การพา และแผ่รังสีความร้อน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ในกระบวนการคำนวณแบบวนซ้ำ จะทำให้ได้มาซึ่งจำนวนของท่อไฟเล็กในหม้อไอน้ำในที่สุด ความแม่นยำของโปรแกรม วัดผลจากวิธีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณ กับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนหม้อไอน้ำจริง เพื่อประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจากการคำนวณมีค่า 76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพจากการตรวจวัดจากหม้อไอน้ำจริง 81.567 เปอร์เซ็นต์แล้วพบว่า ความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมเท่ากับ 6.82 เปอร์เซ็นต์ โดยความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเป็นผลจากการเผาไหม้จริง ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ส่งผลต่อความแม่นยำของโปรแกรมได้ หากเทียบกับการเผาไหม้ในทางทฤษฎี สมมติฐานของโปรแกรม กับการดำเนินการใช้หม้อไอน้ำจริงมีความแตกต่างกัน

คำหลัก: หม้อไอน้ำชนิดท่อไฟ, พื้นที่ถ่ายเทความร้อน, โปรแกรมเชิงตัวเลข

Abstract

This paper presents a spreadsheet program developed for heat transfer surface calculation in the fire-tube boiler. The obtained heating surface is related to the pre-defined parameters such as; the length and diameter of the furnace, the length and diameter of fire tube and required steam generation capacity etc. The program procedure involves 1) Ultimate and stoichiometry analyses of selected solid fuel for obtaining flue gas composition, 2) Utilization of combustion theory to obtain the amount of fuel and air under desired thermal throughput 3) Employment of the empirical and analytical models of convection, conduction and radiation mode of heat transfer as appropriate to determine the overall heat transfer and estimate the required surface for boiling mode of heat transfer. With iterative method, a number of tubes would finally be obtained. The predictive performance of this numerical program would then be assessed using the measured data from a fire tube boiler. The results showed that the efficiency of the boiler from the calculation is 76 percent compared with measured boiler efficiency is 81.567 percent. An error percentage is 6.82 percent because actual combustion depends on fuel compositions affected of program accuracy if compare with combustion in theory. A program assumptions are different if compare with actual boiler operation.

Keywords: Fire-tube boiler, Heat transfer surface, Numerical Program.

TSF-07

รายการสัญลักษณ์

$(\% \frac{m}{m})_{dry}$	เปอร์เซ็นต์โดยมวลปราศจากความชื้น	$h_{w,input}$	เอนทัลปีของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ
$(\% \frac{m}{m})_{ash}$	เปอร์เซ็นต์โดยมวลของขี้เถ้า	h_{fg}	เอนทัลปีของการระเหย
X_{fuel}	ปริมาณธาตุใด ๆ ในเชื้อเพลิงเชิงปริมาณ	$C_{p,avg}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
LHV	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
V_{mois}	ปริมาตรของความชื้นในเชื้อเพลิง	h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
$m_{perkgfuel}$	องค์ประกอบธาตุในหน่วยกิโลกรัมเชื้อเพลิง	h_{rad}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการแผ่รังสี
$m_{h,perkgfuel}$	องค์ประกอบธาตุไฮโดรเจนในหน่วยกิโลกรัม เชื้อเพลิง	h_o	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนด้านนอก
$m_{o,perkgfuel}$	องค์ประกอบธาตุออกซิเจนในหน่วยกิโลกรัม เชื้อเพลิง	h_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนด้านใน
$\dot{m}_{fluegas}$	อัตราการไหลของแก๊สไอเสีย	k	ค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุ
$\dot{m}_{fuel}$	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง	D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก
AF_{actual}	อัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงจริง	D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน
AF_{stoi}	อัตราส่วนอากาศ-เชื้อเพลิงทฤษฎี	Nu	ตัวเลขนัสเซิลท์
ΔT	ส่วนต่างอุณหภูมิ	Re	ตัวเลขเรโนลด์
$T_{ambient}$	อุณหภูมิบรรยากาศ	ε	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี
A_s	พื้นที่ผิวรับความร้อน	σ	ค่าคงที่สเตฟานส์-โบลท์ซมันน์
R_{th}	ค่าความต้านทานความร้อน	T_s	อุณหภูมิผิว
R_{tot}	ค่าความต้านทานความร้อนรวม	T_{surr}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบ
R_{rad}	ค่าความต้านทานความร้อนการแผ่รังสี	ε_g	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊ส
$R_{conv,o}$	ค่าความต้านทานความร้อนการพาความร้อนด้านนอก	ε_c	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
$R_{conv,i}$	ค่าความต้านทานความร้อนการพาความร้อนด้านใน	ε_w	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของไอน้ำ
R_{cond}	ค่าความต้านทานความร้อนการนำความร้อน	$\Delta \varepsilon$	ส่วนต่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี
Q	ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการต้มน้ำ	C_c	แฟกเตอร์ค่าแก้ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
$Q_{com-sat.liq}$	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการ ต้มน้ำจากสถานะของเหลวเป็นของเหลวอิ่มตัว	C_w	แฟกเตอร์ค่าแก้ของไอน้ำ
$Q_{sat.liq-sat.vapor}$	ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการ ต้มน้ำจากสถานะของเหลวอิ่มตัวเป็นไออิ่มตัว	C_l	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของเหลว
Q_{actual}	ความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ให้หม้อไอน้ำ	Pr_l	ตัวเลขพริ้นด์เทิลของของเหลว
eff	ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ	ΔT_x	ส่วนต่างอุณหภูมิของของเหลวกับอุณหภูมิอิ่มตัว
h_{boiler}	เอนทัลปีของไอน้ำที่ผลิตได้	C_{sf}	ค่าคงที่ความตึงผิวของเหลว
		q	ฟลักซ์ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่
		μ_l	ค่าความหนืดของของเหลว
		g_c	ตัวประกอบการแปลง
		$\sigma_{tension}$	ค่าแรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับไอ

TSF-07

g	ค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลวอิ่มตัว
ρ_v	ความหนาแน่นของไออิ่มตัว
P	ความดัน
P_{cr}	ความดันวิกฤติ
P_r	ความดันรีดิวส์
F_p	แฟกเตอร์ค่าแก้ความดันรีดิวส์

1. บทนำ

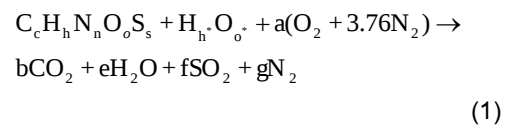
การพัฒนาโปรแกรมคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำ ถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการออกแบบหม้อไอน้ำในส่วนของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนทั้งในด้านน้ำ และด้านไฟ โดยที่ค่าของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณ จะสัมพันธ์กับการกำหนดตัวแปรในการออกแบบหม้อไอน้ำ เช่น ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางท่อไฟใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนท่อไฟเล็ก และกำลังการผลิตของไอน้ำที่ต้องการ โดยโปรแกรมดังกล่าวนำเสนอในรูปแบบของสเปรดชีต เพื่อเป็นต้นแบบของโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับใช้งาน ในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้หม้อไอน้ำเป็นเครื่องจักรต้นกำลัง หรือโรงไฟฟ้า รวมถึงใช้ในงานออกแบบหม้อไอน้ำ องค์ความรู้ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมใช้ การวิเคราะห์แยกธาตุของเชื้อเพลิงในการบวนการเผาไหม้ เพื่อหาคุณสมบัติของก๊าซไอเสีย [1] ใช้ทฤษฎีการเผาไหม้ เพื่อคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณไอเสียที่ผ่านชุดท่อไฟ [2] ใช้ทฤษฎีการนำ การพา และแผ่รังสีความร้อน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำ [3] โดยตั้งสมมติฐานให้การถ่ายเทความร้อนไปสู่ น้ำในหม้อไอน้ำมีลักษณะเป็น Nucleate pool boiling และพฤติกรรมการไหลของน้ำในท่อในส่วนของห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับผสมกับการเดือด [4] นอกจากนี้ได้นำระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีการถดถอยหลายเชิงแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Multiple Least Squares Regression) [5] สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟค่าแก้ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ วิธีการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นตรง (Linear Spline Interpolation) [6] สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟความแตกต่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Delta epsilon) โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ดังกล่าวถูกใช้เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแก๊สไอเสีย การพัฒนาโปรแกรมการคำนวณดังกล่าวเป็นคำนวณแบบวนซ้ำ เพื่อหาจำนวนท่อไฟเล็กที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบหม้อไอน้ำ ตามกำลังการผลิตไอน้ำที่ต้องการ ดังนั้นความแม่นยำของโปรแกรมวัดผลจากวิธีการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนจากโปรแกรม กับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนหม้อไอน้ำจริง เพื่อประเมินค่าประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ เพื่อใช้ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อปรับแก้โปรแกรมให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ก่อนพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปในอนาคตต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์แยกธาตุ (Dry basis)

การวิเคราะห์แยกธาตุ วิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบโมเลกุลของไอเสีย เพื่อนำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางความร้อนของไอเสีย ก่อนนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำในหม้อไอน้ำ จากสมการการเผาไหม้ทางทฤษฎี (Stoichiometric) และสมการการเผาไหม้สัดส่วนอากาศมากกว่าเชื้อเพลิง (Lean combustion)



องค์ประกอบของเชื้อเพลิงจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบ หากจะทำมาวิเคราะห์แยกธาตุจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยคิดเฉพาะเชื้อเพลิงไม่มีความชื้นสมการต่อไปนี้เป็น [1]

$$\left(\frac{m}{m}\right)_{\text{dry}} = \frac{(x_{\text{fuel}})(100)}{100 - (V_{\text{mois}})} \quad (2)$$

จะต้ององค์ประกอบเชื้อเพลิงแต่ละธาตุซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน(C) ไฮโดรเจน(H) ไนโตรเจน(N) ออกซิเจน(O) ซัลเฟอร์(S) และ เถ้า (Ash) จากนั้นนำองค์ประกอบของธาตุดังกล่าวให้อยู่ในหน่วย มวลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง [1]

$$m_{\text{perkgfuel}} = \frac{\left(\frac{m}{m}\right)_{\text{dry}}(100 - V_{\text{mois}})}{100} \quad (3)$$

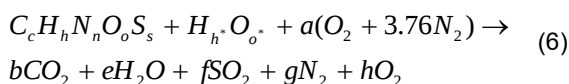
และสำหรับธาตุไฮโดรเจน และออกซิเจนของน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงในหน่วยมวลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการ [1]

TSF-07

$$m_{h,perkgfuel} = \frac{V_{mois}(\frac{2}{18})}{100} \quad (4)$$

$$m_{o,perkgfuel} = \frac{V_{mois}(\frac{16}{18})}{100} \quad (5)$$

การวิเคราะห์แยกธาตุ ทำให้ทราบถึงจำนวนโมลของแต่ละโมเลกุลในไอเสียของการเผาไหม้ทางทฤษฎี และการเผาไหม้จริง



สมการดังกล่าวคือสมการการเผาไหม้แบบอากาศเกิน (Lean combustion) จะมีออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ในไอเสีย เมื่อดุลสมการเสร็จสมบูรณ์จะทราบสัดส่วนโมล และสัดส่วนมวล ของแต่ละโมเลกุลของไอเสีย ใช้ข้อมูลดังกล่าวมาเขียนโปรแกรมโดยตัวแปรต้นคือ อุณหภูมิของไอเสียซึ่งมาจากการคำนวณ และตัวแปรตามคือคุณสมบัติทั้งเชิงกล และทางความร้อนของไอเสีย

2.2 ทฤษฎีการเผาไหม้ การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิง และปริมาณไอเสียที่ผ่านชุดท่อไฟ

อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงคือปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิ ความดัน และสถานะที่ต้องการหารด้วยค่าความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง (Low Heating Value) โดยตั้งสมมติฐานให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงจนหมด ดังนั้นอัตราการไหลของไอเสีย หาค่าได้จากสมการดังต่อไปนี้ [1][2]

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q}{LHV} \quad (7)$$

$$Q = \frac{Q_{com-sat.liq} + Q_{sat.liq-sat.vapor}}{\frac{eff}{100}} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{fluegas} = (1 - \frac{(\% \frac{m}{m})_{ash}}{100})[(\dot{m}_{fuel}) + (AF_{actual})(\dot{m}_{fuel})] \quad (9)$$

โดยการคำนวณคิดเสมือนการเผาไหม้จริงเพราะฉะนั้นจะมีถ้าเหลือจากการเผาไหม้ ไม่ถูกเผาไปด้วยจึงต้องมีตัวประกอบค่าแก้ไขสำหรับสมการอัตราการไหลของไอเสีย สำหรับอุณหภูมิของไอเสีย และเปลวไฟแอดิเยกแบติคหาได้โดยสมการ [1]

$$จาก \quad Q = \dot{m} C_{p_{avg}} \Delta T \quad (10)$$

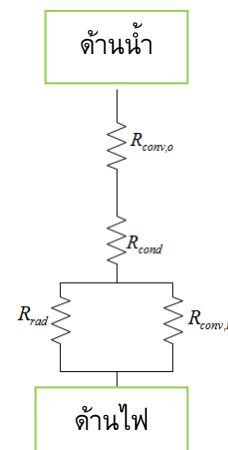
$$T_{fluegas} = \frac{Q}{\dot{m}_{fluegas@excessair} C_{p_{avg}}} + T_{ambient} \quad (11)$$

$$T_{flame} = \frac{Q}{\dot{m}_{fluegas@stoic} C_{p_{avg}}} + T_{ambient} \quad (12)$$

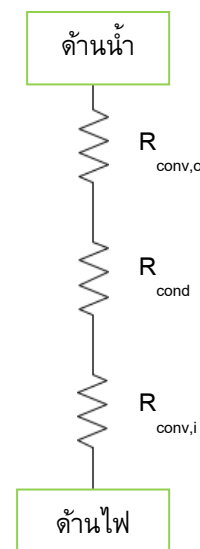
อุณหภูมิของไอเสียจะนำมาวิเคราะห์การพาความร้อน สำหรับอุณหภูมิเปลวไฟจะนำมาใช้วิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนวิเคราะห์เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป

2.3 ทฤษฎีการนำ การพา และแผ่รังสีความร้อน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

ความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีจะถูกรวมกับการพาความร้อน



รูปที่ (1) Thermal resistance diagram ของการถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้ไปยังท่อน้ำ



TSF-07

รูปที่ (2) Thermal resistance diagram ของการถ่ายเทความร้อนจากท่อไฟฟ้าไปยังด้านน้ำ

จากรูปที่ (1) สามารถนำผลรวม R_{th} มารวมกันได้ ตัวแปร U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม โดย หาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [10]

$$\frac{1}{UA_s} = R_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{rad}} + \frac{1}{R_{conv,o}}} + R_{cond} + R_{conv,i} \quad (13)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}A_s} \quad (14)$$

เมื่อนำ R_{rad} แทนค่าลงในสมการที่ (24)

$$\frac{1}{U_o \pi D_o} = \frac{\frac{1}{h_o h_{rad}}}{\left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{rad}}\right) \pi D_o} + \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi k} + \frac{1}{h_i \pi D_i} \quad (15)$$

สำหรับกรณีของรูปที่ (2) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{U \pi D} = \frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi k} + \frac{1}{h_o \pi D_o} \quad (16)$$

สำหรับสมการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งจะนำไปคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อน โดยจากการคำนวณพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม คือ h หรือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [10]

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^2 - T_{surr}^2)(T_s - T_{surr}) \quad (17)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สไอเสียจาก วิธีการถดถอยหลายเชิงแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Multiple Least Squares Regression) [5] สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟค่าแก๊ส สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ วิธีการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นตรง (Linear Spline Interpolation) [6] สำหรับสร้างเส้นแนวโน้มจากกราฟความแตกต่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Delta epsilon) โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขดังกล่าวถูกใช้เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแก๊สไอเสีย [14]

$$\varepsilon_g = C_c \varepsilon_{c,1atm} + C_w \varepsilon_{w,1atm} - \Delta \varepsilon \quad (18)$$

สำหรับค่า h_o และ h_i ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน คำนวณจากสมการ [11]

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad (19)$$

สำหรับการเลือกใช้สมการ Nusselt number นั้นมีหลักเกณฑ์การพิจารณาหลายตัวแปร เช่น พฤติกรรมการไหลของของไหลเพื่อจำแนกว่า ของไหลดังกล่าวมีลักษณะเป็นแบบใด จากการวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จำเป็นต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำ โดยตั้งสมมติฐานให้การถ่ายเทความร้อนไปสู่น้ำในหม้อไอน้ำมีลักษณะเป็นการเดือดอย่างเต็มที่ (Nucleate pool boiling) และพฤติกรรมการไหลของน้ำในท่อในส่วนของห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับผสมกับการเดือด [4] สำหรับพฤติกรรมของแก๊สไอเสียในห้องเผาไหม้นั้นตั้งสมมติฐานว่า เป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) การเขียนโปรแกรมมีความจำเป็นที่ต้องทดสอบพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันเพื่อนำมาเปรียบเทียบหาสมการที่เหมาะสมที่สุดในการเขียนโปรแกรม โดยนำค่าพื้นผิวรับความร้อนที่ได้จากโปรแกรมไปเทียบกับหม้อน้ำจริง โดยสมการความสัมพันธ์ก่อตัวการเดือดของน้ำ Rohsenow มีสมการดังนี้[3]

$$\frac{C_l \Delta T_x}{h_{fg} Pr_l^{1.7}} = C_{sf} \left[\frac{q}{\mu_l h_{fg}} \sqrt{\frac{g_c \sigma_{tension}}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{0.33} \quad (20)$$

สมการดังกล่าวระบุลักษณะของภาชนะ ไม่ส่งผลมากนักต่อการเดือดของน้ำ สิ่งที่สำคัญขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่นำความร้อน ไม่ใช่รูปร่างของภาชนะรับความร้อน [3] จากคำนวณจะใช้สมการดังกล่าวในการหา ฟลักซ์ความร้อนที่จำเป็นที่ทำให้น้ำเดือด จนผลิตไอน้ำได้ตามความต้องการ สำหรับการเดือดของน้ำที่มีการไหลอยู่ในท่อ มีสมการดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{Q}{A}\right)_{total} = \left(\frac{Q}{A}\right)_{boiling} + \left(\frac{Q}{A}\right)_{forcedconvection} \quad (21)$$

สำหรับการเดือดของน้ำไหลในท่อเรียบ Rohsenow และ Griffith เสนอว่า ผลของการพาความร้อนแบบบังคับสามารถใช้ความสัมพันธ์ Dittus-Boelter ในการคำนวณได้ [4] สำหรับความสัมพันธ์ Dittus-Boelter [12] ใช้สมมติฐานเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ดังต่อไปนี้

$$Nu_d = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^{0.3} \quad (22)$$

Re คือ Reynold number ของการไหลภายในท่อและ Pr คือ Prandtl number ค่า Pr หาจากการเปิดตารางการถ่ายเทความร้อน ส่วน Re เป็นฟังก์ชันของความเร็ว, ความหนืดจลน์, ความหนาแน่นของไหล และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ สำหรับการคำนวณการพาความร้อน

TSF-07

เพียงอย่างเดียวเลือกใช้สมการที่ (22) แต่หากเป็นการผสมกันของการเดือดและการพาแบบบังคับนั้น Rohsenow และ Griffith แนะนำว่า ควรเปลี่ยนจาก 0.023 เป็น 0.019 [4] สำหรับสมการที่ (23) การหาค่า h_o จากด้านน้ำสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ Mostinski [13]

$$h_o = 0.00417 q^{0.7} p_{cr}^{0.69} F_p \quad (23)$$

$$F_p = 1.8 P_r^{0.17} + 4 P_r^{1.2} + 10 P_r^{10}, P_r = \frac{P}{P_{cr}} \quad (24)$$

และในส่วนของหม้อไอน้ำด้านน้ำซึ่งไหลท่วมท่อ การไหลนั้นตั้งสมมติฐานเป็นการไหลแบบภายนอก (External flow) โดยเลือกใช้ความสัมพันธ์เชิงตัวเลขของ Jakob [15] และ Zukauskas [16] ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวด้านนอกของท่อทรงกระบอก และสื่อกลางที่พาความร้อนสามารถเป็นได้ทั้งสถานะแก๊ส และของเหลว โดยความสัมพันธ์เขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Nu &= 0.989 Re^{0.330} Pr^{1/3}; 0.4 \leq Re < 4 \\ Nu &= 0.911 Re^{0.385} Pr^{1/3}; 4 \leq Re < 40 \\ Nu &= 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}; 40 \leq Re < 4000 \\ Nu &= 0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3}; 4000 \leq Re < 40000 \\ Nu &= 0.027 Re^{0.805} Pr^{1/3}; 40000 \leq Re < 400000 \end{aligned} \quad (25)$$

สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพหม้อน้ำจริง คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพจากการตรวจวัดจากหม้อน้ำจริง

$$eff = \frac{h_{boiler} - h_{w,input}}{Q_{actual}} \times 100 \quad (26)$$

4. การวิเคราะห์ผล

4.1 การทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมถูกพัฒนาในรูปแบบของสเปรดชีตเพื่อวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จำเป็นต้องการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ในกระบวนการคำนวณแบบวนซ้ำ การทำงานของโปรแกรมเป็นไปตามแผนผัง flow chart ดังที่แสดงในรูปที่ (3)

4.2 วิธีการวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ความแม่นยำของโปรแกรมทำโดยการตรวจหม้อน้ำ 2 ครั้ง โดยครั้งที่หนึ่งตรวจขณะที่หม้อน้ำหยุดการทำงาน หลังจากหม้อน้ำเริ่มเย็นลงแล้วสามารถเข้าไปวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆดังต่อไปนี้

คือ ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาของท่อไฟใหญ่-ท่อไฟเล็ก จำนวนท่อในหม้อน้ำ รูปแบบการวางท่อไฟเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อน้ำ โดยจากการตรวจวัดดังกล่าว สามารถทราบพื้นที่รับความร้อนของหม้อน้ำจริง ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากโปรแกรม โดยหากการคำนวณจากโปรแกรมนั้นใช้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า พื้นที่ถ่ายเทความร้อนในหม้อน้ำทั้งหมด บ่งชี้ว่าหม้อน้ำดังกล่าวสามารถใช้งานได้ไย่นานที่ผู้ใช้โปรแกรมตั้งพารามิเตอร์ไว้สำหรับการตรวจครั้งที่สองคือตรวจในขณะที่หม้อน้ำกำลังทำงานโดยวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ ความดัน อัตราการผลิตไอน้ำ อุณหภูมิของไอน้ำเสีย คุณภาพของแก๊สไอเสีย อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจริง ชนิดของเชื้อเพลิง ตัวแปรเหล่านี้จะเป็นตัวแปรต้นในการคำนวณหาประสิทธิภาพจริงของหม้อน้ำ

4.3 ผลการวิเคราะห์โปรแกรม

4.3.1 วิเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงค่า n_{pre}

ตารางที่ 1 ตารางแสดงจำนวนท่อที่เหมาะสมในการใช้งานจากการคำนวณครั้งแรกโดยโปรแกรม

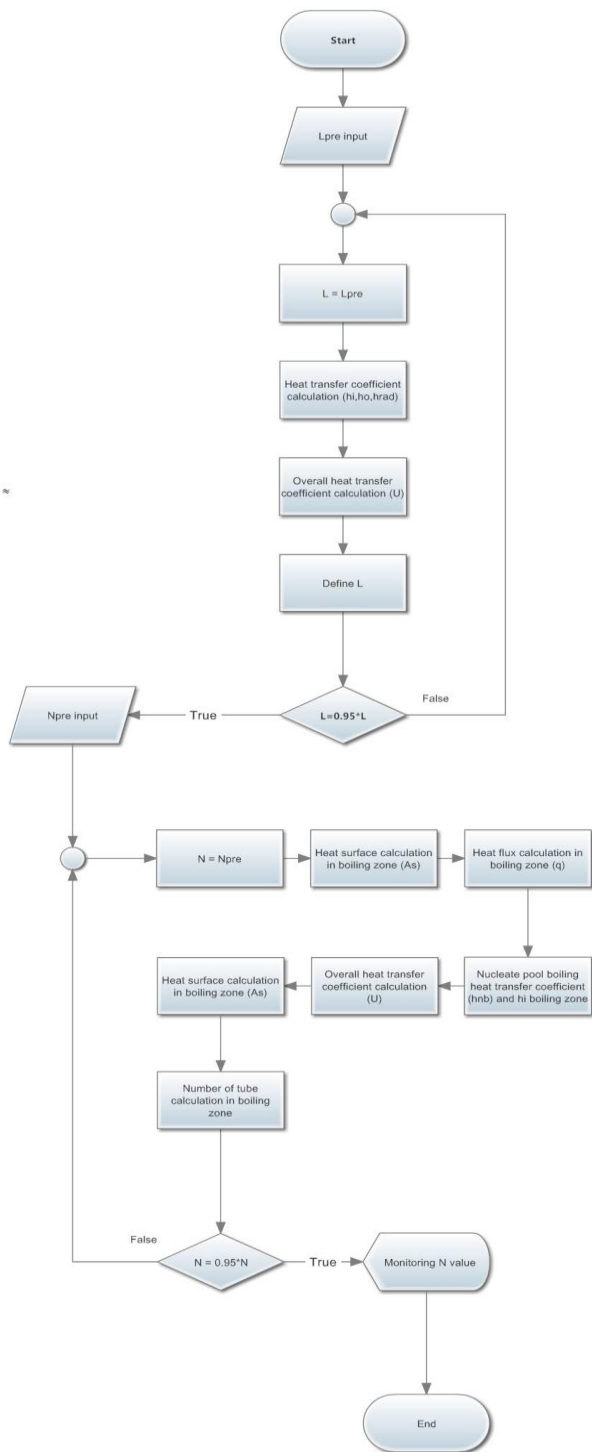
N_{pre}	$U(W/m^2K)$	$As(m^2)$	N	%error
5	177.0156	3.034	6.566	84.37
10	101.828	5.2754	11.413	72.83
15	73.6797	7.2908	15.774	62.44
20	58.564	9.1725	19.84	52.76
42	32.39	16.584	35.882	14.56
50	28.1811	19.062	41.2413	1.80
54	26.502	20.270	43.854	4.41
100	16.2029	33.154	71.73	70.78

กำหนด พารามิเตอร์คงที่ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของท่อไฟ

	L(m)	ID(m)	Thickness (mm)	N
ท่อไฟใหญ่	3	0.8	16.5	1
ท่อไฟเล็ก ^{1st}	2.66	0.41	4	54
ท่อไฟเล็ก ^{2nd}	3	0.41	4	42

TSF-07



รูปที่ (3) Flow chart แสดงวิธีการทำงานของโปรแกรม
ตารางที่ 4 ตารางข้อมูลสำหรับวิเคราะห์แก๊สไอเสีย

ข้อมูล	ค่า	หน่วย
	ตรวจวัด/ บันทึก	
% ออกซิเจนในไอเสียเฉลี่ย	10.827	%
% คาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย	9.640	%
คาร์บอนมอนนอกไซด์เฉลี่ย	267.205	ppm

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เฉลี่ย	-	ppm
ออกไซด์ของไนโตรเจนเฉลี่ย	-	ppm
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย	61.135	kg/hr
อุณหภูมิไอเสียเฉลี่ย	161.733	°C
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย	41.163	°C
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	4,251	kcal/kg
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเสียที่อุณหภูมิ 161.733 °C	0.3281	kcal/ Nm ₃ °C

ตารางที่ 5 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

ข้อมูล	ค่าตรวจวัด/ บันทึก	หน่วย
อัตราน้ำป้อนเฉลี่ย	0.392	m ³ /hr
อุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ย	76.367	°C
ความดันไอน้ำเฉลี่ย (P _{abs})	5.113	bar
อัตราน้ำที่โบล์วทาวน์	14.460	
อัตราเชื้อเพลิงที่ใช้เฉลี่ย	61.135	kg/hr
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (Wood Pellet)	17.795	kg/hr
ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ	81.567	MJ/kg
		Percent

โดยข้อมูลหม้อไอน้ำจากตารางที่ 4 และ 5 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเอกชน [17] เพื่อนำมาใช้เทียบกับโปรแกรมคำนวณ จากตารางที่ 1 พบว่าการตั้งค่า n_{pre} ที่ 50 มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดอยู่ที่ 1.8 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า n_{pre} คงที่ เท่ากับ 50 เพื่อลดปริมาณรอบของการคำนวณแบบวนซ้ำ ให้มีจำนวนรอบน้อยที่สุดเพื่อความรวดเร็วในการคำนวณ

4.3.2 วิเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพหม้อน้ำ

ตารางที่ 6 ตารางแสดงจำนวนท่อที่เหมาะสมในการใช้งานจากการคำนวณครั้งแรกโดยโปรแกรม

Efficiency	U(W/m ² K)	As(m ²)	N	%error
50	53	33.9	9.12	78.29
60	45.75	38.85	20.01	52.36
70	40	45.98	35.44	15.62
80	35.4	57.7	60.76	44.67
90	31.67	88.44	127.31	203.12

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ผลการคำนวณครั้งแรกของการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพ มีความคลาดเคลื่อนสูง

TSF-07

ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการคำนวณแบบวนซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจากการคำนวณของโปรแกรม

4.3.3 วิเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพหม้อไอน้ำด้วยกรรมวิธีการคำนวณแบบวนซ้ำ

ตารางที่ 7 ตารางแสดงจำนวนท่อนที่เหมาะสมในการใช้งานจากการคำนวณแบบวนซ้ำ

Efficiency	U(W/m ² K)	As(m ²)	N	%error
50	22884	29.67	0.02	99.95
60	1615	29.91	0.565	98.65
70	155	33.85	9.08	78.38
75	51	45.24	33.8	19.52
76	41.03	50	44.1	5
78	26.05	64.53	75.6	80
80	16.31	90.5	131.89	214.02

จากผลการคำนวณแบบวนซ้ำพบว่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจากการคำนวณมีค่า 76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหากเทียบกับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำจริงนั้น ประสิทธิภาพอยู่ที่ 81.567 เปอร์เซ็นต์ เพราะฉะนั้นความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมเท่ากับ 6.82 เปอร์เซ็นต์ โดยความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเป็นผลจาก ประสิทธิภาพการเผาไหม้จริง ซึ่งส่งผลโดยตรงกับองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ หากเทียบกับการเผาไหม้ในทางทฤษฎี ซึ่งสมมติฐานของโปรแกรม กับการดำเนินการใช้หม้อไอน้ำจริงอาจแตกต่างกัน เพราะฉะนั้นผู้วิจัยจำเป็นต้องพัฒนาโปรแกรมให้มีความใกล้เคียงกับการดำเนินการใช้หม้อไอน้ำจริงให้มากที่สุด

5.บทสรุป

จากการคำนวณพบว่าโปรแกรมยังมีความผิดพลาดสูงถึง 6.82 เปอร์เซ็นต์ซึ่ง ตามหลักวิศวกรรมแล้วถือว่ายังมากเกินไป มีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนสมมติฐานการคำนวณให้เหมือนกับ การผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำให้มากที่สุด โดยการพัฒนาโปรแกรมหากง่านั้น เป็นประโยชน์สำหรับการผลิตหม้อไอน้ำ การตรวจสอบหม้อไอน้ำ และการใช้หม้อไอน้ำ โดยสิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือความปลอดภัยซึ่งหากโปรแกรมเลือกใช้สมการความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของการทำงานจริง จะสร้างความมั่นใจให้ทั้งผู้ใช้งาน และผู้ผลิตหม้อไอน้ำ ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวจำเป็นต้องพัฒนาให้มีความแม่นยำสูงที่สุด วิธีที่ทำให้เกิดความแม่นยำสูงที่สุดนั้น การพัฒนาโปรแกรมต้องควบคู่กับ

การตรวจสอบหม้อไอน้ำ จึงจะทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างสมบูรณ์ โปรแกรมที่มีความสมบูรณ์คือโปรแกรมที่สามารถใช้กับหม้อไอน้ำต่างชนิด ต่างประเภทเชื้อเพลิงได้ ซึ่งทางผู้วิจัยได้วางแผนต่อไปว่าจะนำโปรแกรมมาพัฒนาสำหรับหม้อไอน้ำชนิดท่อแนวน และหม้อไอน้ำแบบผสม ก่อนพัฒนาเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อสะดวกในการใช้งานเพื่อวิศวกรผู้ตรวจสอบ และผู้ผลิต สามารถสร้าง และซ่อมบำรุงหม้อไอน้ำให้มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย ลดอุบัติเหตุจากการใช้หม้อไอน้ำลงได้ ถือเป็นความสำเร็จที่ผู้วิจัยตั้งใจหมายไว้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ รศ.ดร.จรรวดี จริญญา อาจารย์ที่ปรึกษาผู้คอยให้คำแนะนำทั้งทางทฤษฎี และการเขียนโปรแกรม
ขอบคุณอาจารย์รัชชัย นาคพิพัฒน์ จากบริษัท Ferko industry จำกัด ที่ให้โอกาสได้ตรวจสอบหม้อไอน้ำจริงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม
ขอบคุณบริษัท L Y industry จำกัด ที่ให้โอกาสตรวจหม้อไอน้ำชนิดท่อไฟสำหรับใช้เปรียบเทียบกับโปรแกรม
ขอบคุณ ทีมตรวจวัดประสิทธิภาพจาก บริษัท โปร เอ็นเนอร์ยี แอนด์ เอ็นจิเนียริง จำกัด สำหรับรายงานการตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำที่ บริษัท L Y industry จำกัด

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.R. Turn, "Combustion and Thermochemistry", An Introduction to Combustion, Second edition, Singapore:McGraw-Hill, 2000, p. 13-15.
- [2] S.R. Turn, "Combustion and Thermochemistry", An Introduction to Combustion, Second edition, Singapore:McGraw-Hill, 2000, p. 19-20.
- [3] Rohsenow, W.M.,: A Method of Correlation of Maximum Heat Flux Data for Surface Boiling Liquids, Trans. ASME, vol.74, p. 969, 1952.
- [4] Rohsenow, W.M., and P.Griffith, "Correlation of Maximum Heat Flux Data for Boiling of Saturated Liquids, AIChE-ASME Heat Transfer, Trans. ASME, vol 80, p.711, 1958.
- [5] วรสิทธิ์ กาญจนกิจเกษม, "การประมาณค่าในช่วงและการวิเคราะห์การถดถอย", ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข, พิมพ์ครั้งที่ 1, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557, 187-188

TSF-07

- [6] วรสิทธิ์ กาญจนกิจเกษม, “การประมาณค่าในช่วงและการวิเคราะห์การถดถอย”, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข, พิมพ์ครั้งที่ 1, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557, 159
- [7] J.P. Holman, “Steady-state Conduction-one Dimension”, Heat transfer, Fourth edition, Tosho PRINTING CO., LTD. TOKYO JAPAN:Mc-Graw-Hill, 1976, p. 25-27
- [8] J.P. Holman, “Steady-state Conduction-one Dimension”, Heat transfer, Fourth edition, Tosho PRINTING CO., LTD. TOKYO JAPAN:Mc-Graw-Hill, 1976, p.29
- [9] J.P. Holman, “The Overall Heat-transfer Coefficient”, Heat transfer, Fourth edition, Tosho PRINTING CO., LTD. TOKYO JAPAN:Mc-Graw-Hill, 1976, p. 29-30
- [10] Yunus A. Cengel, “The Thermal Resistance Concept”, Heat transfer, Second edition, Mc-Graw-Hill, 2002, p. 130
- [11] Yunus A. Cengel, “FUNDAMENTALS OF CONVECTION”, Heat transfer, Second edition, Mc-Graw-Hill, 2002, p. 336
- [12] Dittus,F.W.m and L.M.K. Boelter: Univ.Calif. (Berkeley) Pub. Eng., vol. 2, 1930, p.443
- [13] Mostinski, I. L., “Application of the Rule of Corresponding States for Calculation of Heat Transfer and Critical Heat Flux,” Teploenergetika (Moscow, Russ. Fed.), vol. 4, 1963, pp. 66–71.
- [14] Dunkle, R.V.: “Geometric Mean Beam Lengths for Radiant Heat Transfer Calculations,” J., Heat Transfer, vol. 86, p. 75, February 1964.
- [15] M. Jakob. Heat Transfer. Vol. I. New York: John Wiley & Sons, 1949.
- [16] A. Zukauskas. “Heat Transfer from Tubes in Cross Flow.” In Advances in Heat Transfer, ed. J. P. Hartnett and T. F. Irvine, Jr. Vol. 8. New York: Academic Press, 1972.
- [17] บริษัท โพร เอ็นเนอร์ยี แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด, รายงานสรุปผลการตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง บริษัท แอล.วาย. อินดัสตรีส์ จำกัด (เชื้อเพลิง Wood Pellet). กรุงเทพมหานคร:บริษัท โพร เอ็นเนอร์ยี แอนด์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด, 2558. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)