

การพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อการออกแบบรีคูเพอเรเตอร์สำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม

Development of a Recuperator Design Software for Industrial Furnaces

พงศภรณ์ อาดัม¹ และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปทุมวัน กรุงเทพฯ

โทร 0-2218-6637 โทรสาร 0-2252-2889 E-mail : oh_adam@hotmail.com¹, fmespt@eng.chula.ac.th²

Pongsaporn Adam¹ and Sompong Putvisutisak²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

Tel : 0-2218-6637 Fax : 0-2252-2889 E-mail : oh_adam@hotmail.com¹, fmespt@eng.chula.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแก้ปัญหาทางด้านการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนและความดันสูญเสียเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ (Recuperator) ชนิด Gas-to-Gas สำหรับการไหลแบบ Cross Flow โดยในการคำนวณทางด้านพลังงานความร้อนได้ใช้วิธี Effectiveness-NTU ส่วนการวิเคราะห์หาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ได้ใช้วิธี $P_1 - P_2$ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ตัวประกอบทางคณิตศาสตร์ประเภทหนึ่ง หลังจากทำการทดสอบโปรแกรมกับปัญหาตัวอย่าง พบว่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

Abstract

A computer program to solve the thermal energy exchange and pressure drop for designing a cross-flow gas-to-gas recuperator is presented. The Effectiveness-NTU method is employed to calculate the thermal energy exchange and the $P_1 - P_2$ method is used to analyze the optimum heat exchanger surface area. The program is tested with a sample problem. A satisfactory result is obtained.

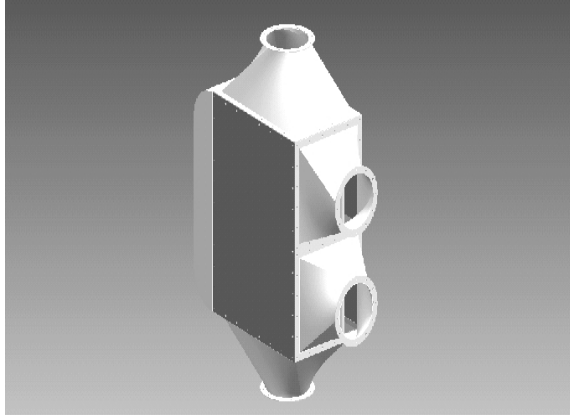
1. บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่าง Gas กับ Gas หรือที่เรียกกันว่า รีคูเพอเรเตอร์ (Recuperator) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปที่ใช้เตาเผาในการหลอมและขึ้นรูปโลหะเนื่องจากในกระบวนการเผาไหม้ในเตาเผา ไอเสียที่ถูกทิ้งไปยังมีความร้อนที่สูงอยู่ สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก ซึ่งการนำไอเสียมาแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านตัว รีคูเพอเรเตอร์ เพื่อนำไปอุ่นอากาศก่อน

เข้าเผาไหม้ จะทำให้ได้อุณหภูมิของอากาศเข้าเผาไหม้สูงขึ้นและทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีความสม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลให้จำนวนเชื้อเพลิงที่ใช้ลดลง วรวิทย์ มั่นสกุล [1] ได้ศึกษาและออกแบบรีคูเพอเรเตอร์สำหรับเตาเผาขึ้นรูปสปริงแผ่น ด้วยวิธี Effectiveness - NTU ซึ่งทำให้สามารถประหยัดน้ำมันเตาที่ใช้ลงประมาณ 9 % Wetter [2] ได้จำลองการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์เพื่อหาการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ระหว่างอากาศกับอากาศ ในระบบปรับอากาศ โดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรเช่น อัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิ และการจัดเรียงการไหล ซึ่งพบว่าสามารถคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็ว Jolly et al. [3,4] ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์พร้อมทั้งทำการทดลองเพื่อออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Bayonet Element โดยโปรแกรมสามารถคำนวณผลกระทบจาก Conduction, Convection และ Radiation ซึ่งจำกัดขอบเขตอุณหภูมิภายใน Shell มีค่าไม่เกิน 1600 °C Kara and Guraras [5] ได้ประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Shell and Tube ชนิด U-tube และ Fixed Tube Sheet โดยโปรแกรมสามารถคำนวณหาขนาดทั้งหมดและหาค่าความดันสูญเสียทั้งใน Shell และ Tube ได้

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณซ้ำสำหรับการออกแบบรีคูเพอเรเตอร์ เนื่องจากในกระบวนการออกแบบ จะต้องกำหนดพารามิเตอร์จำนวนมาก เช่น ขนาดความยาวท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งภายนอกและภายในท่อ ฯลฯ เพื่อให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อน และค่าการสูญเสียความดัน ตรงตามที่ต้องการ ซึ่งแม้ว่ากระบวนการคำนวณดังกล่าวสามารถคำนวณได้ด้วยมือ แต่ก็ใช้เวลาค่อนข้างนานมาก ประกอบกับ ค่าตอบสุดท้ายของการออกแบบอาจมีได้หลายคำตอบ เนื่องจากผู้ออกแบบสามารถกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและความยาวท่อได้ใน

ขนาดต่างๆกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของวิศวกรผู้ออกแบบ ดังนั้นโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงสามารถช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณและหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมได้ โดยใช้วิธี $P_1 - P_2$ [6,7] เพื่อประกอบการตัดสินใจในการออกแบบ จากโปรแกรม ค่าคุณสมบัติของของไหลที่แปรเปลี่ยนตามค่าอุณหภูมิ สามารถคำนวณโดยอัตโนมัติ จากการใช้วิธีเชิงตัวเลข Polynomial Regression เข้ามาช่วย ซึ่งทำให้ไม่ต้องเสียเวลาเปิดตารางหาค่าคุณสมบัติของของไหล โดยตารางค่าคุณสมบัติของของไหลได้อ้างอิงจาก Incropera [8] โดยตัวรีคูเพอเรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รีคูเพอเรเตอร์สำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม

2. ทฤษฎี

กระบวนการออกแบบรีคูเพอเรเตอร์เริ่มจากการที่ผู้ใช้โปรแกรมต้องใส่ข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นเพื่อใช้ในการคำนวณได้แก่ อุณหภูมิของอากาศและไอเสียที่ทางเข้าอุปกรณ์อุณหอากาศ ($T_{a,i}, T_{fg,i}$) อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศและไอเสีย ($\dot{m}_a, \dot{m}_{fg}$) ค่า Fouling Factor ด้านในท่อและด้านนอกท่อ (F_i, F_o) องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย O_2, CO_2, N_2 ค่า Thermal Conductivity ของวัสดุที่ใช้ทำท่อ (k) ค่าความดันสูญเสียทั้งในท่อและในเปลือกที่ยอมรับได้ และข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เช่น ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง ชั่วโมงการทำงานต่อปี ราคาน้ำมัน ราคาในการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ อายุการใช้งาน อัตราดอกเบี้ย เมื่อใส่ข้อมูลพื้นฐานครบถ้วน ก็เริ่มทำการคำนวณโดยโปรแกรมจะรับค่า Effectiveness (ε) ที่ผู้ออกแบบได้สมมติขึ้นในขั้นต้น จากนั้นตัวโปรแกรมก็จะคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ทางออก ($T_{a,o}$) โดยใช้สมการ (1) และคำนวณหาความร้อน (Q) และอุณหภูมิไอเสียที่ทางออก ($T_{fg,o}$) โดยใช้สมการ (2)

$$\varepsilon = \frac{C_{p,a}(T_{a,o} - T_{a,i})}{C_{\min}(T_{fg,i} - T_{a,i})} \quad (1)$$

$$Q = C_{p,a}(T_{a,o} - T_{a,i}) = C_{p,fg}(T_{fg,i} - T_{fg,o}) \quad (2)$$

โดยอัตราค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ $C_{p,a} = \dot{m}_a \times c_{p,a}$ และอัตราค่าความร้อนจำเพาะของไอเสีย $C_{p,fg} = \dot{m}_{fg} \times c_{p,fg}$ เมื่อ $c_{p,a}$ และ $c_{p,fg}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของอากาศและไอเสียตามลำดับ และเนื่องจากตัวอุปกรณ์อุณหอากาศที่ออกแบบมีการจัดเรียงการไหลเป็นแบบ Parallel Cross Flow (2 Pass) ดังนั้น ค่า Number of Transfer Unit (NTU) สามารถหาจากความสัมพันธ์ในสมการ (3)

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{C_r \times NTU}{2}\right) + v^2 \left[1 + \exp\left(-\frac{C_r \times NTU}{2}\right) \right] \right\} \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ} \quad v = \exp\left(-\frac{1 - \exp(-C_r \times NTU / 2)}{C_r}\right)$$

$$\text{และ} \quad C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

โดย $C_{\min}$ คือค่าที่น้อยสุด $C_{\max}$ คือค่าที่มากที่สุดระหว่างค่า $C_{p,a}$ และ $C_{p,fg}$ ตามลำดับ หลังจากนั้นสมมติค่า Overall Heat Transfer Coefficient, U_{guess} เพื่อหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อน, A จากสมการ (4)

$$NTU = \frac{U_{\text{guess}} A}{C_{\min}} \quad (4)$$

เมื่อได้ค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อนแล้ว ต้องกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ, ความหนา และความยาวของท่อ เพื่อคำนวณหาจำนวนท่อ หลังจากนั้นกำหนดระยะ Transverse Pitch, Longitudinal Pitch ฯลฯ และตรวจสอบค่า Overall Heat Transfer Coefficient ในทางทฤษฎี, U_{theory} ดังนี้

$$U_{\text{theory}} = \frac{1}{\left(\frac{D_o}{D_i}\right) \left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{D_o}{D_i}\right) F_i + \left(\frac{D_o}{2k}\right) \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + F_o + \left(\frac{1}{h_o}\right)} \quad (5)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านในท่อ (h_i) สามารถคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter (อ้างอิงใน [8])

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{0.4} \quad (6)$$

สำหรับ

$$Re_D \geq 10,000$$

$$h_i = \frac{Nu_D k}{D_i} \quad (7)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผ่านกลุ่มท่อ (h_o) สามารถคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ของ Grimson (อ้างอิงใน [8])

$$\overline{Nu}_D = 1.13 C_1 Re_{D,\max}^m Pr^{1/3} \quad (8)$$

สำหรับ

$$2000 < Re_{D,\max} < 40,000$$

$$h_o = \frac{\overline{Nu_D} k}{D_o} \quad (9)$$

เมื่อค่า C_i และ m เป็นค่าคงที่ซึ่งหาได้จากตารางใน [8] โดยถ้าค่า $|U_{theory} - U_{guess}| < 1$ ให้ทำการคำนวณค่าความดันสูญเสียต่อไป แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 1 ให้กลับไปกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อใหม่ โดยค่าความดันสูญเสียด้านในท่อหาจากสมการ (10) และค่าความดันสูญเสียด้านเปลือก หาจากสมการ (11) ตามลำดับ

$$\Delta P_i = 2 f_i \rho V_{max,i}^2 L \frac{N_L}{D_i} \quad (10)$$

$$\Delta P_o = N \chi \left(\frac{\rho V_{max,o}^2}{2} \right) f_o \quad (11)$$

โดยที่ f_i คือตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลภายในท่อซึ่งสามารถหาได้จาก Moody Chart ρ คือความหนาแน่นของของไหล $V_{max,i}$ คือความเร็วสูงสุดของของไหลที่ผ่านท่อด้านใน L คือความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน N_L คือจำนวนที่ยวการไหลของของไหลในท่อ N คือจำนวนแถวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนตามแนวยาว χ และ f_o คือตัวคูณแก้ไขและตัวประกอบความเสียดทานสำหรับการไหลผ่านกลุ่มท่อซึ่งหาได้จากกราฟใน [8] $V_{max,o}$ คือความเร็วสูงสุดที่ไหลผ่านหน้าตัดของท่อภายนอก ดังนั้นถ้าค่าความดันสูญเสียทั้งในท่อ (ΔP_i) และในเปลือก (ΔP_o) มีค่าเกินกว่าที่ยอมรับได้ ให้กลับไปกำหนดขนาดท่อใหม่ แต่ถ้าน้อยกว่าเป็นอันว่าการคำนวณดังกล่าวเข้าสู่ค่าตอบแล้ว จากขั้นตอนนี้สามารถหาข้อมูลที่ได้ ไปออกแบบสร้างได้ทันที หรือถ้าต้องการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรม เพื่อหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมให้คำนวณด้วยวิธี $P_1 - P_2$ โดยจากนิยามค่าการประหยัดพลังงานสุทธิเชิงเศรษฐศาสตร์ที่ได้จากการนำความร้อนทั้งมาใช้ประโยชน์ Net Savings (S) คือ

$$S = P_1 C_E \varepsilon (\dot{m} C_p)_{\min} \Delta T_{\max} \Delta t - P_2 C_A \left(\frac{NTU (\dot{m} C_p)_{\min}}{U} \right) \quad (12)$$

โดยเทอมแรกทางด้านขวามือของสมการ คือจำนวนเงินที่สามารถประหยัดได้จากการที่นำเอาความร้อนทั้งมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง ส่วนเทอมที่สอง คือ จำนวนเงินที่ต้องสูญเสียไปจากการสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศซึ่งคิดตามพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยที่ P_1 คืออัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนที่ประหยัดได้ตลอดอายุการใช้งานต่อค่าความร้อนที่ประหยัดได้ในปีแรก P_2 คืออัตราส่วนระหว่างราคารวมตลอดอายุการใช้งานต่อราคาเริ่มต้น C_E คือราคาพลังงานในปัจจุบัน (฿/J) ซึ่งค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงที่ใช้ (น้ำมันเตา A) มีค่า

NHV = 39.77 MJ/L แต่จากการสมดุลพลังงานในเตาเผา [1] พบว่ามีพลังงานจากน้ำมันเพียง 21.46% ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยราคาน้ำมันเตาในขณะนั้นคือ 9.45 บาท/ลิตร จากการคำนวณพบว่า C_E มีค่า 5×10^{-8} ฿/J C_A คือราคาต่อหน่วยพื้นที่ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (฿/m^2) ε คือค่า Effectiveness ที่ได้ออกแบบไว้ NTU คือ Number of Transfer Unit ซึ่งหาจากสมการความสัมพันธ์ในสมการ (3) U คือค่า Overall Heat Transfer Coefficient หาได้จากสมการ (5) $\Delta T_{\max}$ คือค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดซึ่งหาจากค่าอุณหภูมิของไอเสียที่ทางเข้าลบด้วยอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า Δt คือระยะเวลาการใช้งานภายในเวลา 1 ปี คิดเป็นวินาที และ $(\dot{m} C_p)_{\min}$ คืออัตราค่าความจุความร้อนจำเพาะที่น้อยที่สุดของของไหล โดยโปรแกรมจะแสดงกราฟค่า NTU ที่ได้ออกแบบไว้ โดยค่า NTU จะมีผลต่อค่า Effectiveness และค่า Net Savings การวิเคราะห์หาความเหมาะสมสามารถทำได้โดยออกแบบให้จุดสูงสุดของเส้นกราฟ Net Savings ตัดกับเส้น Effectiveness พอดี ผลดังกล่าวบอกความหมายว่าผลที่ได้มีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมแล้ว แต่ถ้ากราฟไม่ตัดกันที่จุดดังกล่าว ให้กลับไปกำหนดค่า Effectiveness ใหม่อีกครั้ง หลังจากหาคำนวณหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมแล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการคำนวณหาระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period, n) และ อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return, IRR) เมื่อทราบค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้ง (TIC) และค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ (A_s) แล้วก็สามารถหาค่า n และ IRR ได้จากสมการต่อไปนี้

$$TIC \times CRF = A_s$$

โดย

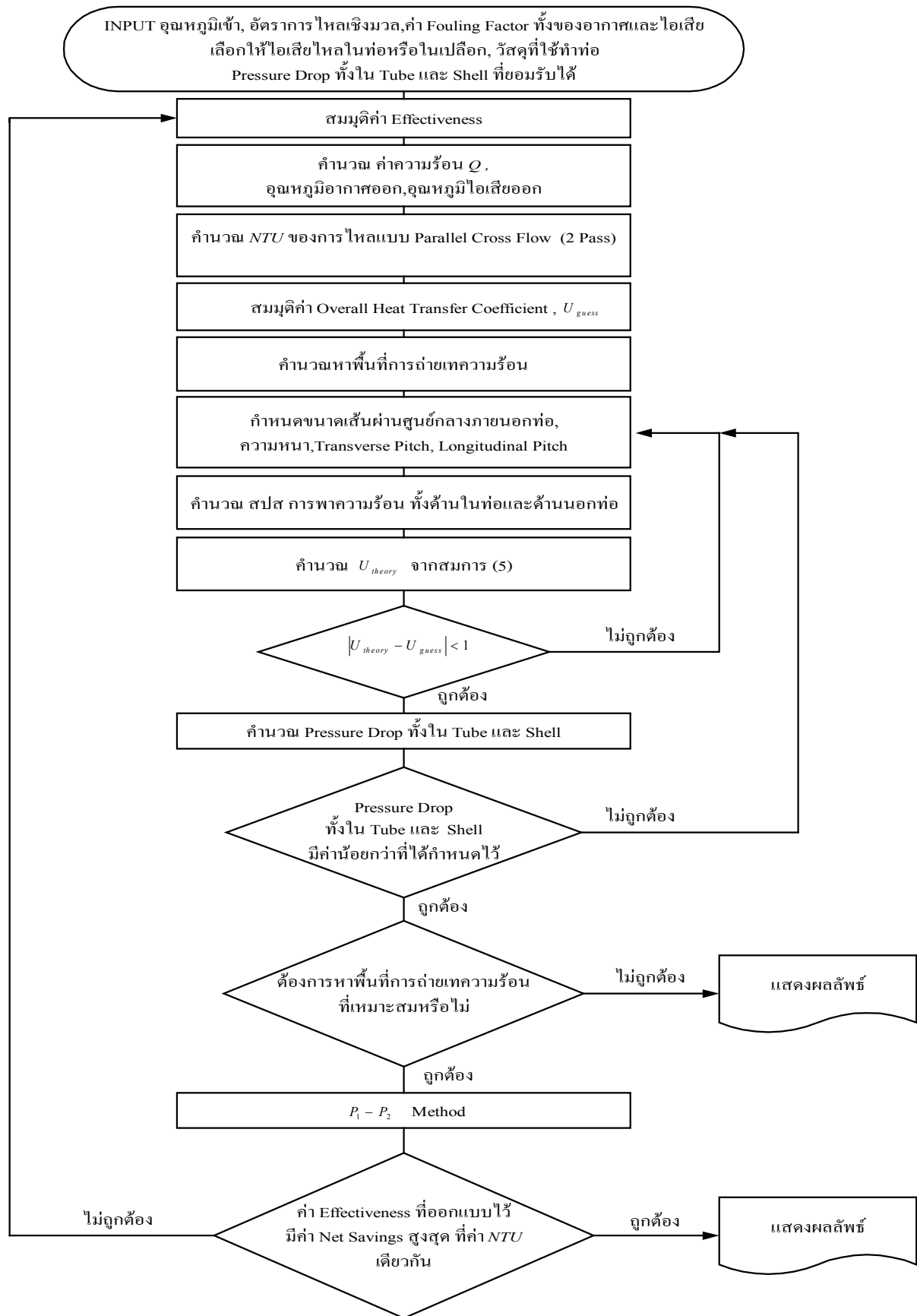
$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]} \quad (13)$$

$$TIC = A_s \left[\frac{1}{(1+IRR)} + \frac{1}{(1+IRR)^y} \right] \quad (14)$$

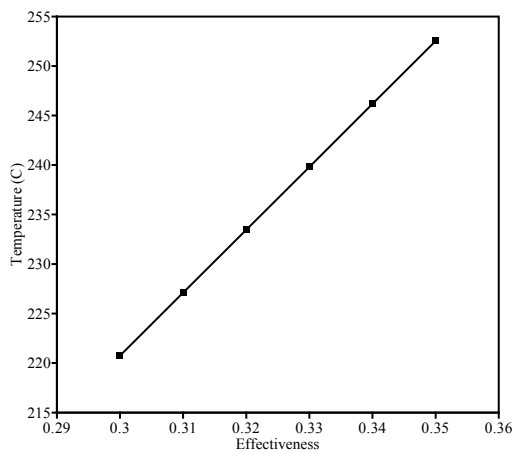
เมื่อ CRF คือตัวประกอบการคืนทุน i คืออัตราดอกเบี้ย และ y คืออายุการใช้งานของอุปกรณ์ โดยขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 2

3. ผลการคำนวณ

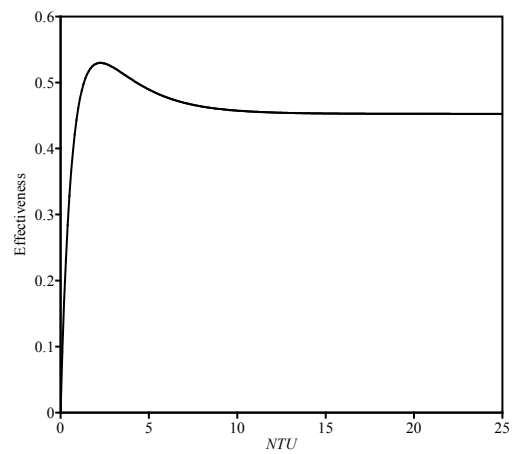
การคำนวณนี้จะใช้ข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นจากงานวิจัยของ วรวิทย์ มั่นสกุล [1] โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณมีค่าดังแสดงในตารางที่ 1



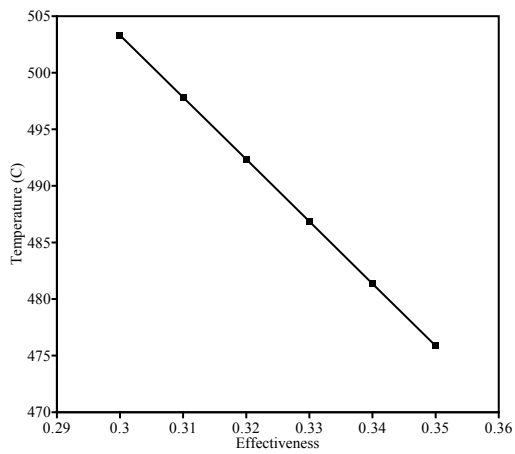
รูปที่ 2 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการคำนวณ



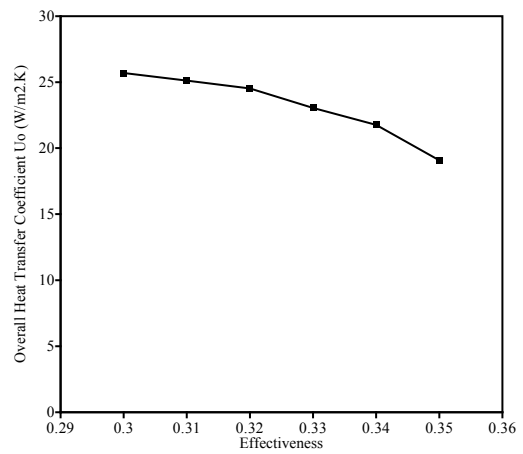
รูปที่ 3 ค่า Effectiveness กับค่าอุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Recuperator



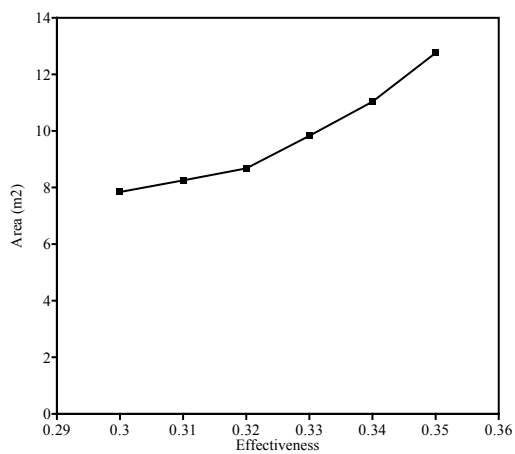
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effectiveness กับค่า NTU สำหรับการไหลแบบ Parallel Cross Flow (2 Pass)



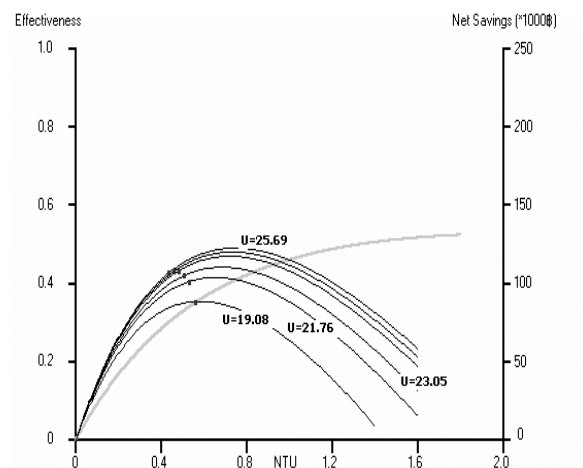
รูปที่ 4 ค่า Effectiveness กับค่าอุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก Recuperator



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effectiveness และค่า Overall Heat Transfer Coefficient จากการคำนวณ



รูปที่ 5 ค่า Effectiveness ที่มีผลต่อพื้นที่การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 8 กราฟความเหมาะสมทางทางด้านเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 1 ค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณ

อุณหภูมิอากาศและไอเสียเข้า	30, 665.8 °C
อัตราการไหลของอากาศและไอเสีย	0.45, 0.472 kg/s
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ	0.0318 m
ความยาวท่อ	1.2 m
ความหนาของผนังท่อ	0.002 m
ระยะ Transverse Pitch	$2 D_o$
ระยะ Longitudinal Pitch	$2 D_o$
Fouling Factor ภายในและนอกท่อ	0.0004 m ² .°C/W
วัสดุที่ใช้ทำท่อ	Stainless 316

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์จากการคำนวณ

Effectiveness	0.35
อุณหภูมิอากาศที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ (°C)	252.53
อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ (°C)	475.86
Number of Transfer Unit (NTU)	0.558
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)	0.0318
พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m ²)	12.7598
จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	107
จำนวน ROW	12
จำนวน COLUMN	9
Maximum Velocity Across Tube Bank (m/s)	4.88
Velocity in Tube (m/s)	8.28
Outside Heat Transfer Coefficient, h_o , (W/m ² .K)	57.4
Inside Heat Transfer Coefficient, h_i , (W/m ² .K)	33.56
Overall Heat Transfer Coefficient, U , (W/m ² .K)	19.08
Pressure Drop in Tube (kPa)	0.16
Pressure Drop in Shell (kPa)	0.04
ความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (MJ/hr)	366.18
ประหยัดค่าใช้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง (บาท/ปี)	516845
ระยะเวลาการคืนทุน Payback Period, n (เดือน)	5.13
อัตราผลตอบแทนการลงทุน, IRR (%)	235

ผลจากการคำนวณสามารถสรุปได้เป็นหัวข้อดังนี้

- เมื่อค่า Effectiveness เพิ่มขึ้นจาก 0.3 ถึง 0.35 จะส่งผลให้อุณหภูมิอากาศที่ออกจาก Recuperator เพิ่มขึ้นจาก 221 °C เป็น 253 °C อุณหภูมิไอเสียที่ออกจาก Recuperator ลดลงจาก 503 °C เป็น 476 °C ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ
- เมื่อค่า Effectiveness เพิ่มขึ้น ทำให้มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจำนวนท่อที่ใช้จึงเพิ่มขึ้นตาม ดังรูปที่ 5
- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Effectiveness กับค่า NTU สำหรับการไหลแบบ Parallel Cross Flow (2 Pass) ที่นำมาประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศนี้ เมื่อค่า NTU เพิ่มขึ้น ค่า Effectiveness จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่า NTU = 2.25 ที่ค่านี้จะให้ค่า Effectiveness สูงสุดเท่ากับ 0.53 หลังจากจุดนี้ไปค่า Effectiveness จะค่อยๆลดลงเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 6

- เมื่อค่า Effectiveness เพิ่มขึ้น ค่า Overall Heat Transfer Coefficient, U มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 7 เนื่องมาจากค่า Convective Heat Transfer Coefficient, h , ภายในท่อ มีค่าลดลงตามจำนวนท่อที่เพิ่มขึ้น
- จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อหาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม ดังรูปที่ 8 พบว่า ที่ค่าการคำนวณ Effectiveness เท่ากับ 0.35, $U = 19.08$ W/m².K เส้นกราฟของค่า Net Savings มีค่าสูงสุดและตัดกับกราฟ Effectiveness พอดี ดังนั้นจึงเลือกที่ค่า Effectiveness เท่ากับ 0.35 ในการออกแบบ

4. สรุป

โปรแกรมที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นสามารถคำนวณและออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ลดภาระการคำนวณซ้ำ โปรแกรมสามารถวิเคราะห์หาพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมได้ โดยใช้วิธี $P_1 - P_2$ เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ จากผลการวิเคราะห์โดยการเพิ่มค่า Effectiveness จาก 0.3 จนถึง 0.35 จึงเลือกที่ค่า Effectiveness เท่ากับ 0.35 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม สามารถทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น 14.4% และสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น 16.9% ซึ่งค่าต่างๆที่ได้หลังจากการคำนวณเสร็จสิ้น แสดงดังตารางที่ 2

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรวิทย์ มั่นสกุล, "การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์อุ่นอากาศด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [2] Wetter, M., "Simulation Model Air-to-Air Plate Heat Exchanger", Simulation Research Group Building Technologies, Department Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 1999.
- [3] Jolly, A.J., Doherty, T.O. and Bates, C.J., "COHEX: A Computer Model for Solving the Thermal Energy in an Ultra High Temperature Heat Exchanger. Part A: Computational Theory", Applied Thermal Engineering, Vol.18 no. 12, pp.1263-1276, 1998.
- [4] Jolly, A.J., Doherty, T.O. and Bates, C.J., "COHEX: A Computer Model for Solving the Thermal Energy in an Ultra High Temperature Heat Exchanger. Part B: Validation and Results", Applied Thermal Engineering, Vol.19 no. 4, pp.389-398, 1999.
- [5] Kara, Y.A. and Guraras, O., "A Computer Program for Designing of Shell-and-Tube Heat Exchangers", Applied Thermal Engineering, Vol.24 no. 13, pp.1797-1805, 2004.
- [6] Soylemez, M.S., "On the Optimum Heat Exchanger Sizing for Heat Recovery", Energy Conversion & Management, Vol. 41, pp. 1419-1427, 2000.
- [7] Soylemez, M.S., "On the Thermoeconomical Optimization of Heat Pipe Heat Exchanger HPHE for Waste Heat Recovery", Energy Conversion & Management, Vol. 44, pp.2509-2517, 2003.
- [8] Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th Edition, John Wiley&Sons, New York, 1996.