การศึกษาแบบจำลองของท่อลมที่คำนึงถึงการรั่วและการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อ

ตุลยวัต แสงวิเชียรกิจ[1] และ เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10300
[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10300
โทร 02-218-6610 โทรสาร 02-252-2889 E-mail meoffice@eng.chula.ac.th.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลมที่คำนึงถึงผลกระทบของการรั่วไหลของลมและการสูญเสียความร้อน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการวิเคราะห์สมรรถนะในการส่งถ่ายพลังงานของท่อลม รูปแบบของท่อลมที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นท่อที่มีหน้าตัดเป็นวงกลมหรือท่อทรงกระบอก การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียผ่านผนังท่อจะใช้หลักความต้านทานเชิงความร้อน (Thermal Resistance) โดยแบ่งความต้านทานเชิงความร้อนออกเป็น 4 ส่วน คือ การพาความร้อนภายในท่อลม, การนำความร้อนผ่านผนังท่อลม, การนำความร้อนผ่านฉนวน และ การพาความร้อนภายนอกท่อลม ในส่วนการรั่วไหลจะพิจารณาการรั่วไหลในสองบริเวณ คือ การรั่วไหลผ่านบริเวณรอยต่อและการรั่วผ่านรูรั่วจากการสึกกร่อน ทั้งนี้ ได้นิยามค่าพารามิเตอร์แสดงสมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงานของท่อลมว่าคือความร้อนภายในระบบท่อลมลบด้วยความร้อนที่สูญเสียหารด้วยความร้อนภายในระบบท่อลม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้สมการพลังงานและแบบจำลองการปั่นป่วน k-omega ผลลัพธ์จากแบบจำลองพบว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อมีค่ามากขึ้น แต่การสูญเสียความร้อนจากการรั่วไหลลดลง อุณหภูมิลมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อและผ่านการรั่วไหลเพิ่มมากขึ้น ความดันสถิตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การสูญเสียความร้อนจากการรั่วไหลเพิ่มมากขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Ansys Fluent V.13 พบว่าผลลัพธ์ทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน

คำหลัก: การสูญเสียความร้อน, การรั่วไหล, การนำความร้อน, การพาความร้อน, สมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงาน

Abstract

The purpose of this research is to study and develop the mathematical model of air duct with both air leakage and heat loss effect in order to analyze the energy transmission performance of air duct. Round or cylindrical air duct is used for analysis in this research. Thermal resistance concept is used for heat transfer analysis in which thermal resistance is divided into 4 parts, i.e. convection within air duct, conduction through duct wall, conduction through insulation and convection outside air duct. Air leakage is considered in 2 regions, i.e. leakage at joints, seams and leakage due to air duct corrosion. The energy transmission performance is defined as ratio of the subtracting heat loss from total heat in duct

system to total heat in the duct system. Mathematical model is developed based on energy equation and K- omega model. Results from the model show that as air velocity increases, heat loss through duct wall increases while heat loss through air leakage decreases. As air temperature increase, both heat losses through duct wall and through air leakage increase. Similarly, by increasing the static pressure, heat loss through air leakage increases. Results from mathematical model are then compared with those received from Ansys Fluent V.13. It is found that a closed agreement is achieved from both results.

1. บทนำ

ระบบปรับอากาศ (Air Conditioning System) เป็นระบบที่ทำหน้าที่ปรับอากาศและควบคุมสภาพอากาศให้มีความเหมาะสมตามสถานที่ปรับอากาศและตามความต้องการของผู้ที่อาศัยในสถานที่นั้นๆ โดยรูปแบบของระบบปรับอากาศส่วนใหญ่นั้นต้องมีระบบท่อลม (Air Duct System) และระบบระบายอากาศ (Ventilation) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยระบบท่อลมในระบบปรับอากาศทำหน้าที่เป็นเส้นทางลำเลียงลมไปแจกจ่ายตามบริเวณที่ถูกปรับอากาศหรือนำอากาศออกจากบริเวณที่ถูกปรับอากาศไประบายออกนอกอาคาร ซึ่งในการออกแบบระบบท่อลมที่ดีนั้น จะต้องออกแบบให้ท่อลมสามารถรักษาสภาวะของลมภายในท่อลมให้อยู่ในสภาวะที่ผู้ออกแบบระบบปรับอากาศต้องการ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติระบบท่อลมจะมีการรั่วซึมอันเนื่องมาจากการประกอบท่อลมที่ไม่เรียบร้อย ณ บริเวณรอยต่อตะเข็บของท่อลมแต่ละท่อน รวมทั้งหากมีการใช้ท่อลมไประยะเวลาหนึ่ง ย่อมมีการสึกกร่อนของท่อลมเกิดขึ้นส่งผลให้เกิดรูรั่วตามบริเวณต่างๆ ทำให้เกิดการรั่วไหลของลมภายในท่อ อันเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียความร้อนจากการรั่วไหลของมวล การสูญเสียความร้อนยังอาจมาจากการหุ้มฉนวนที่ไม่เรียบร้อยของท่อลม ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อลมออกไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบปรับอากาศสูงขึ้นเนื่องจากสมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงานของระบบท่อลมลดลง

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลมที่รวมเอาผลกระทบของการสูญเสียลมและการสูญเสียความร้อนเพื่อวิเคราะห์หาสมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงานของท่อลมภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาวิธีการออกแบบท่อลมที่เหมาะสมต่อไป

2. งานวิจัยในอดีต

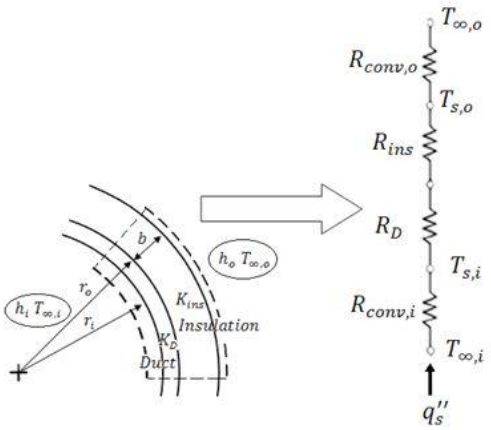
จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยในอดีตที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการสูญเสียความร้อนจากระบบท่อลมและการรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับท่อลม พบว่าจากเอกสารเชิงเทคนิค (Technical Paper) ของ SMACNA [1] ได้แนะนำวิธีการทำนายการรั่วไหลของลมด้วยวิธี Leakage Class โดยแบ่งระดับการรั่วไหลออกตามช่วงความดันและการเชื่อมต่อท่อลม โดยพบว่าที่ชั้นการผนึก (Seal Class) เดียวกัน ความดันที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการรั่วไหลเพิ่มมากขึ้น Parker, D., Fairey, P. และ Gu, L.[2] ได้แสดงให้เห็นว่าการรั่วไหลส่งผลกระทบด้านพลังงานมากกว่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อ Aydin, C. และ Ozerdem, B. [3] ได้ศึกษาระดับการรั่วไหลโดยใช้ Power Law Model ในการคำนวณรวมทั้งได้ศึกษาการรั่วไหลของท่อลมที่มีลักษณะการเชื่อมต่อ (joint) และ รอยตะเข็บ (seam) แตกต่างกัน โดยพบว่าความดันมีผลโดยตรงต่อระดับการรั่วไหล และการรั่วไหลส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณการเชื่อมต่อมากกว่าบริเวณรอยตะเข็บ

3. การพัฒนาแบบจำลอง

เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความสอดคล้องกับสภาพปัญหาจริง แบบจำลองที่พัฒนาได้แยกการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อและการสูญเสียความร้อนจากการรั่วไหลของท่อลม

3.1 การสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อ

การสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อจะอาศัยหลักความต้านทานเชิงความร้อนในการวิเคราะห์ โดยแบ่งความต้านทานเชิงความร้อนออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การพาความร้อนภายในท่อลม, การนำความร้อนผ่านผนังท่อลม, การนำความร้อนผ่านฉนวน และการพาความร้อนภายนอกท่อลม ดังแสดงบนแผนภาพในรูปที่ 1 โดยมีสมมติฐานในการวิเคราะห์ ดังนี้ 1.การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว, 2.การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้, 3.อุณหภูมิที่พื้นผิวมีค่าคงที่, 4.ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในท่อลม และ 5.ไม่คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนตามความยาวท่อ โดยรายละเอียดการวิเคราะห์มีขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 1 องค์ประกอบของผนังท่อลมและการเรียงตัวของความต้านทานเชิงความร้อน

3.1.1 ความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อและ ฉนวน

จากแนวคิดในการสร้างสมการที่ระบุว่าในปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนนั้นจะเปรียบเทียบท่อหน้าตัดอื่นๆ ให้เทียบเท่ากับท่อหน้าตัดวงกลมหรือท่อทรงกระบอก ดังนั้น ความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อและฉนวนที่พิจารณาจึงเป็นความต้านทานเนื่องจากการนำความร้อนตามแนวรัศมีซึ่งมีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$R_{cyl} = \frac{ln(r_o/r_i)}{2\pi Lk} \qquad (1)$$

จากสมการที่ 1 จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของท่อลมที่พิจารณาดังนี้

$$R_D = \frac{ln(r_o/r_i)}{2\pi Lk_D} \qquad (2)$$

และความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนดังนี้

$$R_{ins} = \frac{ln((r_o+\mathrm{b})/r_o)}{2\pi Lk_{ins}} \qquad (3)$$

3.1.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลภายในท่อ

การไหลภายในท่อลมจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) และเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ ดังนั้น จึงพิจารณาถึงสมการที่ใช้หาค่า Nusselt Number ของ Gnielinski [4] ซึ่งได้พัฒนางานวิจัยของ Petukhov and Popov [4] ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่า Nusselt Number ของการไหลแบบปั่นป่วน โดยสมการที่ได้ครอบคลุมการไหลในช่วง Transition Zone ไปจนถึง Fully Developed Flow โดยสมการมีรูปแบบดังนี้

$$Nu_{sm} = \frac{(f_{sm}/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f_{sm})^{1/2}(Pr^{2/3}-1)}\left(1+(D/L)^{2/3}\right) \qquad (4)$$

ค่า f_{sm} เป็นค่า Friction Factor ของการไหลในท่อเรียบ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 5

$$f_{sm} = (0.790\,ln(Re_D)-1.64)^{-2} \qquad (5)$$

ทั้งนี้ สมการที่ 4 และ 5 จะสามารถใช้งานได้ดีในช่วง $0.5 \le \mathrm{Pr} \le 2000$ และ $3000 \le \mathrm{Re} \le 5 \times 10^6$ และเป็นสมการที่ใช้วิเคราะห์การไหลในท่อเรียบ แต่ในสภาพจริง ท่อลมจะมีความขรุขระเกิดขึ้นที่ผิว ดังนั้นจึงใช้สมการของ Norris เข้ามาปรับแก้สมการของ Gnielinski ที่ใช้สำหรับท่อเรียบ โดยสมการของ Norris มีรูปแบบ ดังนี้

$$\frac{Nu}{Nu_{sm}} = \left(\frac{f}{f_{sm}}\right)^n \qquad (6)$$

สมการที่ 6 สามารถใช้งานในช่วง $\frac{f}{f_{sm}} \le 4$ และ $n = 0.68Pr^{0.215}$ เมื่อ $Pr < 6$ และ $n = 1$ กรณีที่ $Pr > 6$ และ $\frac{f}{f_{sm}} > 4$ ค่า Nusselt Number ที่ได้ของ

การไหลในท่อเรียบและในท่อขรุขระจะไม่แตกต่างกัน ดังนั้น จากกระบวนการขั้นต้น เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จากสมการ

$$h_{n,i} = \frac{kNu}{D_h} \tag{7}$$

3.1.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อลม

อากาศภายนอกท่อลมส่วนมากจะมีความเร็วในการไหลที่ต่ำซึ่งสามารถพิจารณาว่าเป็นการพาความร้อนแบบอิสระ ดังนั้น จึงอาศัยสมการของ Churchill และ Chu ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาค่า Nusselt Number ของการพาความร้อนแบบอิสระผ่านผิวท่อทรงกระบอก โดยมีสมการ ดังนี้

$$Nu = \left(0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{(1+(0.559/Pr)^{9/16})^{8/27}}\right)^2 \tag{8}$$

สมการที่ 8 สามารถใช้งานในช่วง $Ra_D \leq 10^{12}$ โดย ค่า Rayleigh Number, Ra_D, สามารถหาได้จากสมการ 9

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_{ins,o} - T_{\infty,o})}{\nu\alpha} D^3 \tag{9}$$

โดยคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในสมการทั้งสองดังกล่าวข้างต้นเป็นคุณสมบัติที่ Film Temperature เท่ากับ $(T_{s,o} + T_{\infty,o})/2$ แต่เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวนอก $(T_{s,o})$ ของท่อลมยังไม่ทราบค่า ดังนั้น จึงใช้วิธี One-Point Iteration เพื่อหาอุณหภูมิผิวนอก โดยอาศัยหลักการที่ว่าฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทมีขนาดคงที่ จึงสามารถสร้างสมการสำหรับการทำซ้ำได้ ดังนี้

$$T_{ins,o}^{k+1} = T_{\infty,i} - \left(\frac{1}{2\pi r_i L h_{n,i}} + \frac{ln(r_o/r_i)}{2\pi L K_D} + \frac{ln((r_o+b)/r_o)}{2\pi L K_{ins}}\right)\left(\frac{T_{ins,o}^k - T_{\infty,o}}{\frac{1}{2\pi r_o L h_{n,o}^k}}\right) \tag{10}$$

เมื่อทราบอุณหภูมิผิวนอกก็จะสามารถหาคุณสมบัติต่างๆของอากาศที่ Film Temperature นั้นได้และสามารถหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อลมโดยใช้สมการ

$$h_{n,o} = \frac{kNu}{D_h} \tag{11}$$

3.1.4 ความต้านทานเชิงความร้อนรวม

จากรูปที่ 1 ความต้านทานเชิงความร้อนรวมสามารถหาได้ โดยพิจารณาว่าความต้านทานแต่ละตัวต่อกันแบบอนุกรม โดยมีสมการ

$$R_{tot} = R_{conv,i} + R_D + R_{Ins} + R_{conv,o} \tag{12}$$

ส่วนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จากสมการ 13

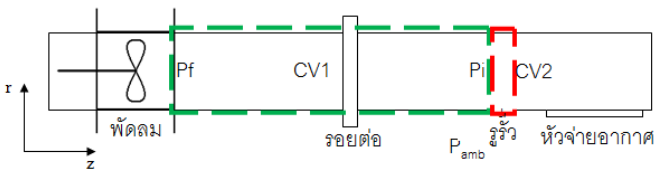
$$q_D = \frac{T_{\infty,o} - T_{\infty,i}}{R_{tot}} \tag{13}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากหัวข้อ 3.1.1 – 3.1.3 ลงในสมการที่ 13 จะได้แบบจำลองในการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง ดังนี้

$$q_D = \frac{T_{\infty,o} - T_{\infty,i}}{\frac{1}{2\pi r_i L h_{n,i}} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k_D L} + \frac{\ln(r_o + b/r_o)}{2\pi k_{Ins} L} + \frac{1}{2\pi r_o L h_{n,o}}} \tag{14}$$

3.2 การสูญเสียความร้อนจากการรั่วไหลของอากาศ

การวิเคราะห์การรั่วไหลจะแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณรอยต่อ รอยตะเข็บ และ บริเวณรูสึกกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีสมมติฐานดังนี้ 1. การไหลเกิดที่สภาวะคงตัว, 2.การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้, 3.การไหลเป็นแบบ 2 มิติ และ 4.การไหลมีการพัฒนาที่สมบูรณ์ โดยการวิเคราะห์มีขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2 ลักษณะของท่อลมและปริมาตรควบคุม (Control Volume)

3.2.1 การรั่วไหลตามแนวรอยต่อ

การหาอัตราการรั่วไหลผ่านบริเวณรอยต่อจะอ้างอิงวิธีการจากงานวิจัยของสมาคมวิศวกรทำความร้อน ความเย็น และการปรับอากาศแห่งสหรัฐอเมริกา (ASHRAE)[5] ซึ่งหาอัตราการรั่วไหลผ่านบริเวณรอยต่อท่อลม โดยมีสมการดังนี้

$$\dot{m}_c = C_l \times P^{0.65} \times \frac{\rho}{100} \times (5.077 \times 10^{-3}) \qquad (15)$$

3.2.2 การรั่วไหลบริเวณรูรั่ว

ในการหาอัตราการรั่วไหลผ่านรูรั่ว จะพิจารณาเปรียบเสมือนว่าลมภายในท่อไหลผ่าน Sharp-Edged 90 Degree Dividing Junction โดยมีขั้นตอนการพิจารณาหาอัตราการรั่วไหล ดังนี้

1.หาความดันตกคร่อมรูรั่ว โดยพิจารณาจากปริมาตรควบคุม 1 ในรูปที่ 2 โดยใช้สมการพลังงานในการวิเคราะห์ ซึ่งจากสมมติฐานดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้จัดรูปสมการได้เป็น

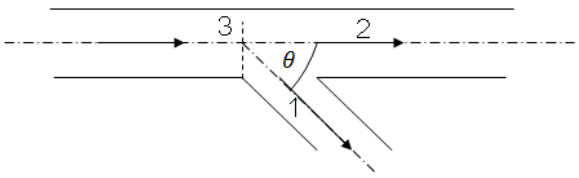
$$P_i = P_f - \frac{1}{2} f\rho \frac{L}{D}\bar{v}_i^2 - \Delta P - \frac{1}{2}\rho\left(\bar{v}_1^2 - \bar{v}_2^2\right) - g\rho\left(z_1 - z_2\right) \qquad (16)$$

จากปริมาตรควบคุม 2 อาศัยสมการ Minor Loss ในการหาความเร็วของการรั่วไหล ซึ่งมีรูปแบบของสมการ ดังนี้

$$\frac{P_i - P_a}{\rho} = \frac{k\bar{v}_i^2}{2} \qquad (17)$$

ทั้งนี้ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองเกิดจากการแยกไหลผ่านรูรั่วดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเป็นฟังก์ชั่นที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและพื้นที่และสามารถหาได้โดยใช้สมการของ Gardel [6] ดังแสดงในสมการที่ 18

$$k_{31} = 0.95(1-q)^2 + q^2\left[\left(1.3\cot\left(\frac{180-\theta}{2}\right) - 0.3 + \frac{0.4-0.1a}{a^2}\right)\left(1 - 0.9\left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right] + 0.4q(1-q)\left(\frac{1+a}{a}\right)\cot\left(\frac{180-\theta}{2}\right) \qquad (18)$$



รูปที่ 3 ลักษณะการไหลผ่าน Sharp-Edged 90 Degree Dividing

เนื่องจาก การวางตัวของรูรั่วทำมุม 90 องศากับท่อหลัก โดย q และ a ในสมการที่ 18 มีค่าเท่ากับ Q_1/Q_3 และ A_1/A_3 ตามลำดับ และจากสมการการไหลแบบต่อเนื่อง $(Q = Av)$ เมื่อแทนค่า k_{31} ลงไปในสมการที่ 17 จะจัดรูปสมการได้เป็น

$$0 = -\left(\frac{P_i - P_a}{\frac{1}{2}\rho\bar{v}_i^2}\right) + 0.95 + \left[(0.4)\left(\frac{1+a}{a}\right) - 1.9\right]\bar{v}_e + \left[\left(1.95 + \frac{(0.4-0.1a)}{a^2} - (0.4)\left(\frac{1+a}{a}\right)\right)\left(\frac{a}{\bar{v}_i}\right)^2\right]\bar{v}_e^2 \qquad (19)$$

จัดรูปสมการที่ 19 ใหม่เพื่อหาความเร็วของการรั่วไหลจะได้สมการที่ 20

$$\bar{v}_e = \left\{-\left[(0.4)\left(\frac{1+a}{a}\right) - 1.9\right] \pm \left[\left[(0.4)\left(\frac{1+a}{a}\right) - 1.9\right]^2 - 4\left[\left(1.95 + \frac{(0.4-0.1a)}{a^2} - (0.4)\left(\frac{1+a}{a}\right)\right)\left(\frac{a}{\bar{v}_i}\right)^2\right]\left[0.95 - \left(\frac{P_i - P_a}{\frac{1}{2}\rho\bar{v}_i}\right)\right]\right]^{1/2}\right\} \Big/ \left\{2\left[\left(1.95 + \frac{(0.4-0.1a)}{a^2} - (0.4)\left(\frac{1+a}{a}\right)\right)\left(\frac{a}{\bar{v}_i}\right)^2\right]\right\} \qquad (20)$$

จากสมการที่ 20 สามารถหาอัตราการรั่วไหลผ่านรูรั่วได้จากสมการ

$$\dot{m}_{leak} = \rho A\bar{v}_e \qquad (21)$$

และหาอัตราความร้อนสูญเสียจากการรั่วไหลของอากาศ จากสมการ

$$q_{leak\ total} = (\dot{m}_{leak} + \dot{m}_c)h \qquad (22)$$

3.3 ความร้อนสูญเสียรวม และ สมรรถนะด้านพลังงาน

จากหัวข้อ 3.1 และ 3.2 สามารถหาความร้อนสูญเสียรวมได้จาก

$$q_{loss\ total} = q_D + q_{leak\ total} \quad (23)$$

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงสมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงานของท่อลม โดยให้นิยามว่าเป็นสัดส่วนระหว่างค่าความร้อนภายในระบบท่อลมลบด้วยความร้อนสูญเสีย (ค่าความร้อนสุทธิภายในระบบท่อลม) กับค่าความร้อนภายในระบบท่อลม โดยมีสมการดังนี้

$$\eta = \frac{\dot{m}_{system}\Delta h - q_{\mathrm{loss,total}}}{\dot{m}_{system}\Delta h} \quad (24)$$

4. ผลลัพธ์จากแบบจำลอง

การคำนวณโดยใช้แบบจำลองนั้น จะกำหนดลักษณะของท่อลมและสถานการณ์การไหลไว้ ดังนี้ 1. อากาศภายในท่อลมมีความชื้นสัมพัทธ์ 90% 2. อุณหภูมิของอากาศภายนอกท่อลมมีค่า 10 องศาเซลเซียส หรือ 283 K และ 3.ใช้ท่อลมเหล็กชุบสังกะสีมีค่าสภาพการนำความร้อน 60.5 W/m.K ยาว 5.8 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.30 เมตร และ มีความหนา 47 มิลลิเมตร รูรั่วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร อยู่ห่างจากทางเข้าของท่อลมเป็นระยะทาง 5 เมตร โดยผลลัพธ์ที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 กรณีหลัก ดังนี้

4.1 ผลลัพธ์เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็ว

ผลลัพธ์ในส่วนนี้ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโดยเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมภายในท่อเป็น3.05, 3.56, 4.06, 4.57, 5.08, 5.89, 6.10, 6.60, 7.11และ 7.62 m/s กำหนดให้อุณหภูมิภายในท่อลมมีค่า 298 K ส่วนความดันขาเข้ามีค่า 248 Pa โดยผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1

4.2 ผลลัพธ์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมภายในท่อ

ผลลัพธ์ในส่วนนี้ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมภายในท่อเป็น 294, 296, 298, 300 และ 302 K และกำหนดให้ความเร็วของลมภายในท่อมีค่าเท่ากับ 3.56 m/s ค่าความดันขาเข้ามีค่า 248 Pa โดยผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2

4.3 ผลลัพธ์เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันขาเข้าท่อลม

ผลลัพธ์ในส่วนนี้ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองโดยเปลี่ยนแปลงความดันขาเข้าท่อลมเป็น 124, 248, 498, 747, 996, 1494 และ 2490 Pa ซึ่งอ้างอิงระดับความดันเหล่านี้จากวิธี Leakage Class และกำหนดให้ความเร็วของลมภายในท่อมีค่าเท่ากับ 3.56 m/s และ อุณหภูมิของลมภายในท่อมีค่า 298 K โดยผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้แบบจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของลม

ความเร็วลมภายในท่อ (m/s)	ความเร็วของการรั่วไหล (m/s)	ความร้อนสูญเสีย			ความร้อนรวมภายในท่อลม (W)	สมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงาน
		จากการรั่วไหลทั้งหมด(W)	จากผนังท่อ (W)	รวม (W)		
3.05	16.92	161.58	172.97	334.54	17444	0.981
3.56	16.83	160.99	177.72	338.71	20317	0.983
4.06	16.75	160.46	181.60	342.06	23219	0.985
4.57	16.66	159.87	184.83	344.71	26122	0.986
5.08	16.57	159.28	187.69	346.97	29024	0.988
5.59	16.47	158.63	190.02	348.65	31927	0.989
6.10	16.38	158.04	192.06	350.10	34829	0.990
6.60	16.28	157.39	193.86	351.25	37732	0.991
7.11	16.18	156.73	195.46	352.19	40634	0.991
7.62	16.08	156.08	196.88	352.96	43537	0.992

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้แบบจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลม

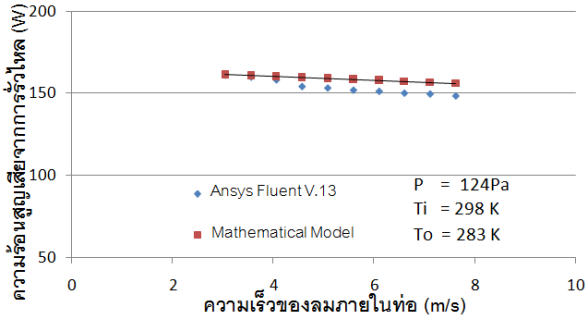
อุณหภูมิของลมภายในท่อ (K)	ความเร็วของการรั่วไหล (m/s)	ความร้อนสูญเสีย			ความร้อนรวมภายในท่อลม (W)	สมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงาน
		จากการรั่วไหลทั้งหมด (W)	จากผนังท่อ (W)	รวม (W)		
293	16.49	128.98	120.25	249.23	16506	0.985
296	16.77	145.00	148.52	293.52	18344	0.984
298	16.88	161.05	177.62	338.67	20317	0.983
300	16.90	178.31	202.70	381.01	22439	0.983
302	16.95	197.33	233.71	431.04	24782	0.982

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้แบบจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันขาเข้าของลม

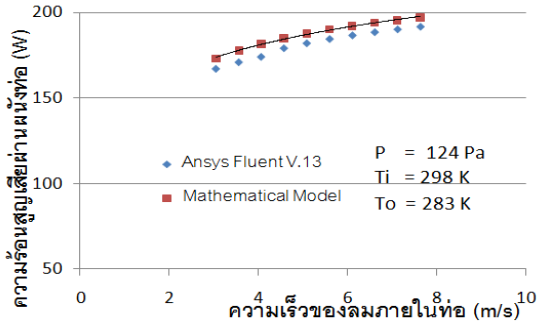
Leakage Class	ความดันขาเข้าท่อลม (Pa)	ความเร็วของการรั่วไหล (m/s)	ความร้อนสูญเสีย			ความร้อนรวมภายในท่อลม (W)	สมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงาน
			จากการรั่วไหลทั้งหมด (W)	จากผนังท่อ (W)	รวม (W)		
C	124	11.72	109.11	177.72	286.83	20317	0.986
C	248	16.88	161.05	177.72	338.67	20317	0.983
C	498	24.06	237.23	177.72	414.95	20317	0.980
B	747	29.60	245.67	177.72	423.39	20317	0.979
A	996	34.26	255.59	177.72	433.31	20317	0.979
A	1494	42.09	316.28	177.72	494.00	20317	0.977
A	2490	54.50	413.56	177.72	591.28	20317	0.971

5.เปรียบเทียบผล

ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม Ansys Fluent V.13 ซึ่งได้สร้างเมชจำนวณ 197,500 เมช และอาศัยแบบจำลอง k-omega และ สมการพลังงานในการจำลองการไหลของอากาศภายในท่อ โดยผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในรูปแบบของกราฟเพื่อดูแนวโน้มของผลลัพธ์ โดยในการเปรียบเทียบผลนั้น จะพิจารณาเปรียบเทียบออกเป็น 2 กรณี คือ ความร้อนสูญเสียผ่านผนัง และความร้อนสูญเสียเนื่องจากการรั่วไหล ดังแสดงในรูปที่ 4–6ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณีนั้นจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4

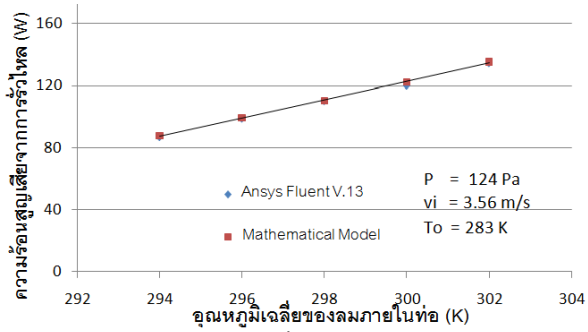


รูปที่ 4 ก

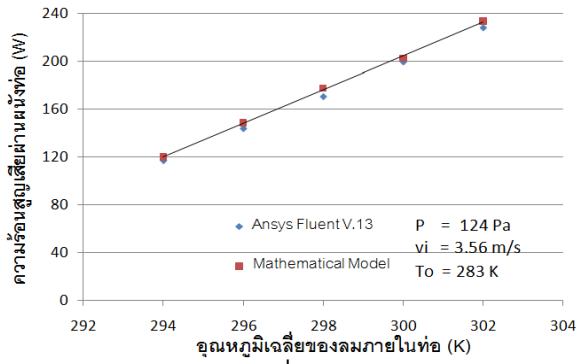


รูปที่ 4 ข

รูปที่ 4 ก. และ ข. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังท่อและจากการรั่วไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็ว

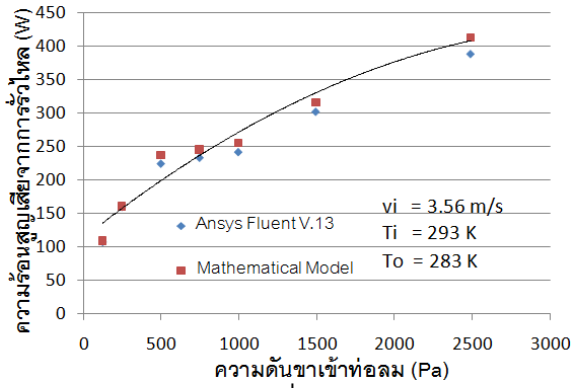


รูปที่ 5 ก

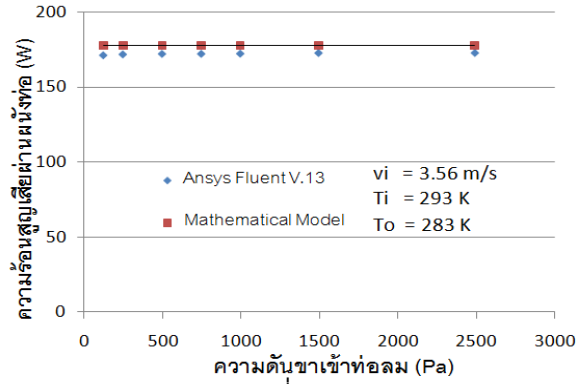


รูปที่ 5 ข

รูปที่ 5 ก. และ ข. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังท่อและจากการรั่วไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 6 ก



รูปที่ 6 ข

รูปที่ 6 ก. และ ข. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังท่อและจากการรั่วไหลเมื่อเปลี่ยนความดันขาเข้าท่อลม

ตารางที่ 4 ค่าความเคลื่อนของผลจากแบบจำลองเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม

กรณีย่อย / กรณีหลัก	ความร้อนสูญเสียจากการรั่วไหลบริเวณรูรั่ว (%)	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังท่อ (%)	สมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงาน (%)
1.ความร้อนสูญเสียเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็ว	0.28 – 6.92	2.65 – 4.22	1.92 – 3.66
2.ความร้อนสูญเสียเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศภายในท่อ	0.35 – 1.93	1.48 – 3.85	1.79 – 4.42
3.ความร้อนสูญเสียเมื่อเปลี่ยนความดันขาเข้า	0.35 – 7.50	2.88 – 3.77	1.91 – 5.12

5.อภิปรายผล

พิจารณารูปที่ 4 ก พบว่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากการรั่วไหลมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อลมภายในมีความเร็วมากขึ้น โดยมีสาเหตุจากความเร็วของของไหลที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความดันสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้นตามแบบยกกำลังสอง ส่งผลให้ความดันที่ตกคร่อมบริเวณรูรั่วมีค่าลดต่ำลง ทำให้ระดับการรั่วไหลมีอัตราที่ลดลง การสูญเสียความร้อนมีค่าลดน้อยลง และ รูป 4 ข พบว่าแนวโน้มของการสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของลมภายในท่อมีค่ามากขึ้น โดยมีสาเหตุจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วส่งผลให้การถ่ายเทพลังงานความร้อนดีขึ้น ทำให้ความร้อนสูญเสียเพิ่มมากขึ้น จากรูป 5 ก การเพิ่มอุณหภูมิของลมภายในท่อทำให้ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการรั่วไหลเพิ่มขึ้นตาม โดยเกิดจากความหนาแน่นของอากาศที่ลดลงและส่งผลให้การสูญเสียความดันลดลง ทำให้ความดันตกคร่อมรูรั่วมีค่ามาก ทำให้การสูญเสียความร้อนมีค่ามากขึ้น และจากรูป 5 ข พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศภายในท่อ ความร้อนสูญเสียที่ถูกถ่ายเทผ่านผนังท่อมีค่าเพิ่มขึ้นตามโดยเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในกับภายนอกมีค่ามากขึ้น และจากรูปที่ 6 ก พบว่าความร้อนสูญเสียจากการรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นตามความดันขาเข้า โดยเกิดจากความดันคร่อมรูรั่วมีค่ามากขึ้น และจากรูป 6 ก และ 6 ข พบว่าความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังท่อนั้นจะมีขนาดคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันเนื่องจากช่วงความดันที่ใช้ในการคำนวณนั้นมีความแตกต่างกันไม่มากจึงไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของอากาศ ผลลัพธ์ที่ได้จึงไม่มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าสมรรถนะการส่งถ่ายพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม โดยมีเหตุผลเนื่องมาจากพลังงานความร้อนรวมในระบบมีค่าเพิ่มตามความเร็ว อีกทั้งยังเป็นปริมาณมีค่ามากเมื่อเทียบกับความร้อนสูญเสียจึงส่งผลให้สมรรถนะการส่งถ่ายพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สมรรถนะการส่งถ่ายพลังงานจะลดลงเมื่อเพิ่มความดัน และ อุณหภูมิเนื่องจากการสูญเสียความร้อนรวมมีค่าเพิ่มขึ้น

7.สรุปผล

1.พบว่าการสูญเสียความร้อนผ่านการรั่วไหลจะขึ้นอยู่กับตัวแปรสำคัญ คือ ความเร็ว, ความดันขาเข้า และ อุณหภูมิ ส่วนความร้อนสูญเสีย ความร้อนผ่านผนังท่อจะขึ้นอยู่ตัวแปรสำคัญ คือ ความเร็ว และ อุณหภูมิ

2.จากตารางที่ 1, 2 และ 3 จะพบว่าค่าสมรรถนะด้านการส่งถ่ายพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของลมที่เพิ่มขึ้น และ มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความดัน หรือ เมื่อเพิ่มผลต่างระหว่างอุณหภูมิภายในท่อลม และ ภายนอกท่อลม

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มเดียวกับผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมรวมทั้งให้ผลลัพธ์ที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Bahnfleth,W. and McWhirter, D. (2008). Impact of Air Return Strategy on Building Energy Consumption and Indoor Air Quality, National Center for Energy Management and Building Technologies Contact. pp. 4-6.

[2] Parker, D., Fairey, P. and Gu, L. (1993) Simulation of the Effects of Duct Leakage and Heat Transfer on Residential Space-Cooling Energy Use , Energy and Building , Vol. 20 , 1993 , pp. 97 – 113 .

[3] Aydin, C. and Ozerdem, B. (2006). Air Leakage Measurement and Analysis in Duct Systems , Energy and Building , Vol . 38 ,2006 , pp. 207 – 213 .

[4] Bergles, A. E. and Webb, R. L. (1970). Augmentation of Convection Heat Mass Transfer, The Society, New York.

[5] SMACNA's HVAC Air Duct Leakage Test Mannual, 1985.

[6] Miller, D. S. (1971). A Guide to Losses in Pipe and Duct Systems, British Hydromechanics Research Association, Bedford.