การพัฒนาโนโมแกรมเพื่อใช้ในการออกแบบระบบท่อลมผ้า

Development of Nomograms for Fabric Duct System Design

ดร. เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์[1]*, ทวีพงศ์ สิริคุตตานนท์[2]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
* chirdpun@hotmail.com, 02-218-6622, 02-252-2889

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน ระบบท่อลมต้องคำนึงถึงรูปลักษณ์ความสวยงาม นอกเหนือจากการออกแบบระบบเพื่อให้ได้การกระจายลมตามที่ต้องการ เนื่องจากการใช้งานในบางแห่ง มีความต้องการใช้งานท่อลมให้เป็นส่วนหนึ่งของการตกแต่งภายในด้วย ดังนั้น จึงเริ่มมีการใช้ระบบท่อลมที่ทำจากวัสดุผ้าขึ้นมาแทนที่ท่อลมโลหะ อย่างไรก็ตาม การออกแบบระบบท่อลมผ้าในปัจจุบัน วิศวกรผู้ออกแบบส่วนใหญ่ต้องอาศัยบริษัทผู้จัดจำหน่ายท่อลมผ้าในการออกแบบ เนื่องจากปัญหาด้านช่องเปิดที่ผิวท่อลมผ้าและและความไม่คงรูปของวัสดุซึ่งมีอิทธิพลต่อการกระจายลม นอกจากนี้วิธีการออกแบบท่อลมที่มีอยู่ ยังไม่สามารถตอบโจทย์การออกแบบระบบท่อลมผ้าได้โดยตรง

งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลมผ้า เพื่อนำไปสู่แนวทางการพัฒนาวิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้าโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า โนโมแกรม ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปหาสมการความเสียดทานที่เหมาะสมสำหรับท่อลมผ้าตลอดจนค่าความดันสถิตขั้นต่ำที่ทำให้ท่อลมผ้าสามารถคงรูปได้อย่างเหมาะสม แบบจำลองสำหรับท่อตรง, ท่อที่มีช่องเปิด และข้อต่อท่อ ถูกสร้างขึ้นและแสดงคำตอบในรูปของโนโมแกรม หลักการเพิ่มขึ้นของความดันสถิตถูกใช้ในการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงข้อจำกัดจากความดันสถิตตั้งต้น ความเร็วการไหลและระยะส่งลมจากช่องเปิดที่ระบบสามารถทำได้ คำตอบจากแบบจำลองไม่ว่าจะเป็นขนาดท่อลม ขนาดและจำนวนช่องเปิดย่อยที่ต้องการ และความดันสถิตที่ต้องการของพัดลมที่ได้จากการอ่านค่าในโนโมแกรมที่พัฒนาขึ้น จะช่วยให้วิศวกรสามารถออกแบบระบบท่อลมผ้าได้สะดวกและง่ายดายยิ่งขึ้น

คำหลัก: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์; ระบบท่อลมผ้า; การออกแบบท่อลม; โนโมแกรม

Abstract

At present, air duct system is being concerned on its outlook due to some applications also require the use of air duct as part of interior decoration apart from distributing air properly as required. Therefore fabric duct is starting to play as another choice for metal duct replacement. However designing fabric duct system nowadays, most designing engineers require assistants from fabric duct suppliers in doing the design. This is because of the surface openings on fabric duct and duct shape instability problems which have influence on air distribution from the duct. Moreover, available air duct design methods cannot be fully applied to the design of fabric duct system.

The objective of this research is then to study and develop mathematical model which leads to fabric duct design method by using nomograms. Results from experiments are used to find appropriate friction equations for fabric duct as well as minimum static pressure to properly maintain the duct shape. Straight duct model, perforated duct model and duct fitting model are developed and solutions are presented in the form of nomograms. The static regain principle with concern on initial static pressure limitation, air flow velocity and the air throw length is used in this analysis. Solutions for duct sizes, no. and size of duct openings and required fan static pressure obtained from developed nomograms can help facilitating the design of fabric duct system for designing engineers.
Keywords: Mathematical model; fabric duct system; duct design; nomograms

1. บทนำ

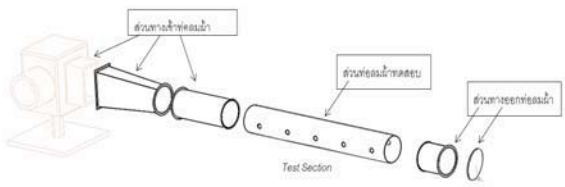
การไหลผ่านระบบท่อลมผ้าจะประกอบด้วยการไหลผ่านท่อตรง (Straight Duct) การไหลผ่านช่วงข้อต่อ (Fitting) และการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิด (Perforated duct) ซึ่งช่องเปิดจะถูกจัดวางให้กระจายไปทั่วตลอดความยาวของท่ออย่างต่อเนื่องและการจ่ายลมจะผ่านช่องเปิดอย่างเดียว ส่งผลให้พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในท่อลมผ้ามีความแตกต่างจากท่อลมปกติทั่วๆ ไป จึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาใหม่สำหรับระบบท่อลมผ้า อย่างไรก็ตาม หากนำชุดสมการที่มีความซับซ้อนไปวิเคราะห์หาผลลัพธ์การคำนวณในทุกๆท่อนของแนวท่อลม ย่อมไม่สะดวกในทางปฏิบัติ ยกเว้นจะเป็นการเขียนในรูปโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ วิศวกรออกแบบส่วนใหญ่ยังคงนิยมใช้ตารางหรือโนโมแกรม (Nomogram) ในการออกแบบ เนื่องจากสะดวกและรวดเร็วในการหาปริมาณต่าง ๆ ที่ต้องการบนท่อลม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาเครื่องมือที่เรียกว่า โนโมแกรม มาช่วยวิเคราะห์เพื่อหาขนาดท่อลมตลอดจนขนาดและจำนวนช่องเปิดในท่อลมแต่ละท่อนเพื่อการกระจายลมตามที่ต้องการผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลม

ที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของความดันและความเร็วการไหลในท่อที่มีช่องเปิด โดย Ibrahim Tas และ Raymond A. A. Bryant [1] ซึ่งพบว่าลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อออกห่างจากพัดลมมากยิ่งขึ้น โดยความดันรวมในท่อจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนการกระจายตัวของความเร็วการไหลในท่อจะมีแนวโน้มลดลงตลอดจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่ปลายท่อ Khaled El Moueddeb[2] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนพื้นที่ต่อการกระจายตัวของความดัน พบว่าลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิตที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดความยาวท่อและมีค่ามากที่สุดที่ปลายท่อ Sangkyoo Lee, Namsoo Moon และ Jeekeun Lee[3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดในท่อ พบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดความยาวท่อ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งสามารถหารายละเอียดเพิ่มเติมได้ในเอกสารอ้างอิง [4]

2. ข้อมูลการทดลองของการไหลผ่านท่อลมผ้า

เมื่อทำการทดลองการไหลผ่านท่อลมผ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 นิ้วด้วยชุดทดลองดังรูปที่ 1 โดยทำการเจาะช่องเปิดจำนวน 3 รูปแบบ (d_0/D=0.791 จำนวน 10 ช่อง 1 แถว, d_0/D=1.118 จำนวน 20 ช่อง 1 แถว, d_0/D=1.581 จำนวน 40 ช่อง 2 แถว)[4,5] เมื่อ d_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าคิดจากพื้นที่ช่องเปิดทั้งหมดบนส่วนท่อลมผ้าทดสอบยาว 5.3 เมตรและ

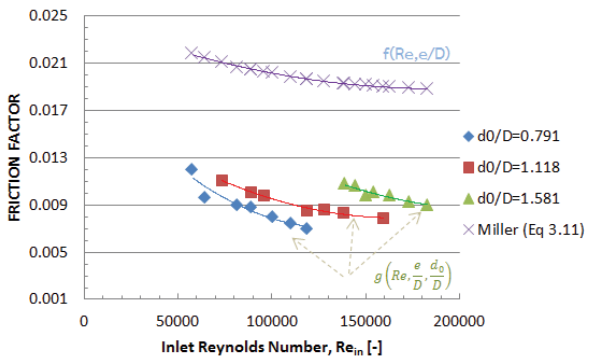
กระจายช่องเปิดให้มีระยะห่างเท่า ๆ กันตลอดความยาวส่วนท่อลมผ้าทดสอบ[4,5]



รูปที่ 1 แสดงภาพ 3 มิติของชุดทดลอง[4,5]

พบว่าท่อลมผ้าจะมีลักษณะเหมือนภาชนะอัดความดันรูปทรงกระบอก และมีค่าความดันสถิตขั้นต่ำเท่ากับ 30 Pa ซึ่งค่าความดันสถิตนี้จะเป็นค่าความดันสถิตขั้นต่ำที่ต้องให้แก่ท่อลมผ้า เพื่อให้ท่อลมผ้านั้นสามารถคงรูปได้อย่างเหมาะสม (รูปที่ 2)

รูปที่ 2 ลักษณะของท่อลมผ้าที่คงรูปเหมาะสม(ซ้าย) และไม่เหมาะสม(ขวา)[4,5]



รูปที่ 3 กราฟแสดงฟังก์ชั่นความเสียดทานต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้า เมื่อ e/D=0.000433[4,5]

ผลการทดลองถูกวิเคราะห์ในรูปของตัวแปรไร้มิติ และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชั่นความเสียดทานต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้าที่อัตราส่วน d_0/D ต่างๆกัน (รูปที่ 3) ซึ่งพบว่าอัตราส่วน d_0/D หรือช่องเปิดในท่อลมผ้ามีอิทธิพลต่อความเสียดทานที่เกิดขึ้นในท่อ โดยค่าอัตราส่วน d_0/D ที่มากขึ้นจะเปรียบเสมือนกับการทำให้ท่อลมผ้านั้นมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น แต่เป็นความขรุขระที่จงใจสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการจ่ายลม

เมื่อพิจารณากราฟฟังก์ชั่นความเสียดทานของ Miller[6] กับกราฟที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่า d_0/D ทั้ง 3 รูปแบบต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้าใดๆ จะเห็นว่ามีแนวโน้มเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาด โดยค่าความเสียดทานที่ได้จากท่อลมผ้าที่มีการเจาะช่องเปิดจะมีค่าน้อยกว่าท่อลมผ้าที่ไม่มีการเจาะช่องเปิดที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้าใด ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลที่ลดลงจากการไหลแบบปั่นป่วนในท่อลมผ้าที่มีการเจาะช่องเปิดอันเป็นผลมาจากการลดลงของความเร็วลมในท่อ

ดังนั้น การพัฒนาฟังก์ชั่นความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้าในงานวิจัยนี้จึงใช้สมการของ Miller[6] ที่มีพื้นฐานจาก Moody chart มาเป็นสมการตั้งต้น โดยใช้วิธีการถดถอยแบบหลายเชิงกับข้อมูลไม่เชิงเส้น (nonlinear multiple regression) เพื่อสร้างฟังก์ชั่นความเสียดทานในท่อลมผ้าสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ดังแสดงไว้ในสมการที่ (1) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-Squared) เท่ากับ 0.916 และนำสมการนี้ไปใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

$$g\left(\mathrm{Re},\frac{e}{D},\frac{d_0}{D}\right)=\frac{0.04215\left(\frac{d_0}{D}\right)\log(\mathrm{Re}_{av})-0.15079\log(\mathrm{Re}_{av})-0.1363\left(\frac{d_0}{D}\right)+0.7711}{\left[\log\left(\frac{e}{3.7D}+\frac{5.74}{\mathrm{Re}^{0.9}}\right)\right]^2} \quad (1)$$

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบท่อลมผ้า

ประกอบด้วยแบบจำลองหลัก 3 แบบ คือ แบบจำลองการไหลผ่านท่อตรง, การไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิด และการไหลผ่านข้อต่อ ซึ่งเพียงพอต่อการวิเคราะห์ระบบการไหลผ่านท่อลมผ้าใดๆ ได้ ในการพัฒนาแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ทำการเปลี่ยนตัวแปรในกลุ่มตัวแปรไร้มิติ เช่น ตัวเลขเรย์โนลด์และความดันจลน์จากเดิมที่แสดงในรูปของความเร็วให้แสดงในรูปของอัตราการไหล ดังนี้ $Re=\frac{4\rho Q}{\pi\mu D}$ และ $P_v=\frac{8\rho Q^2}{\pi^2 D^4}$ เนื่องจากโดยทั่วไปอัตราการไหลมักจะเป็นตัวแปรที่ทราบค่า สมมติฐานในการ

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แก่ การไหลเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้, การไหลเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่, การไหลเป็นแบบ 1 มิติ, การไหลเป็นแบบคงตัว, การไหลเป็นแบบปั่นป่วน, อุณหภูมิของของไหลคงที่ตลอดความยาวท่อ, วัสดุที่ทำท่อลมผ้าไม่มีอากาศรั่วไหลออกนอกเหนือจากตำแหน่งที่กำหนดไว้ และค่าความเสียดทานของข้อต่อข้องอหาจาก ASHRAE fitting database[8]

3.1 แบบจำลองการไหลผ่านท่อตรง (Straight Duct)

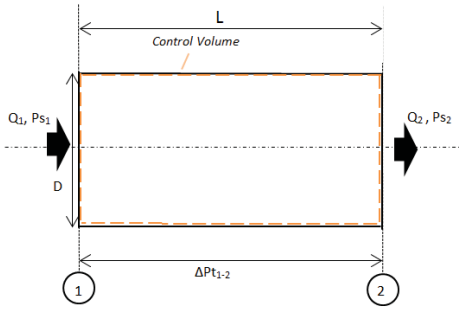
ความดันรวมลดที่เกิดขึ้นจะพิจารณาจากสมการเบอร์นูลลี โดยที่ความเร็วการไหลเข้าเท่ากับความเร็วการไหลออก และฟังก์ชั่นความเสียดทานสามารถหาได้จากสมการของ Miller[6] โดยชุดสมการสำหรับการไหลผ่านท่อตรงหลังการเปลี่ยนตัวแปรในกลุ่มตัวแปรไร้มิติให้อยู่ในรูปของอัตราการไหลได้แสดงไว้ในสมการ (2) และ (3)

สมการอนุรักษ์มวล

$$Q_1 = Q_2 \tag{2}$$

สมการเบอร์นูลลี

$$P_{s,1} = P_{s,2} + 0.25\left[log\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\left(\frac{4\rho Q_1}{\pi\mu D}\right)^{0.9}}\right)\right]^{-2}\frac{L}{D}\frac{8\rho {Q_1}^2}{\pi^2 D^4} \tag{3}$$



รูปที่ 4 แบบจำลองของการไหลผ่านท่อตรง

3.2 แบบจำลองการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิด (Perforated Duct)

การไหลผ่านท่อลมที่มีช่องเปิดเป็นการไหลผ่านท่อลมที่มีขนาดคงที่ โดยมีปริมาณลมไหลผ่านช่องเปิดทั้งหมด q_0 ทำให้อัตราการไหลขาออกลดลงตามสมการอนุรักษ์มวล สมการเบอร์นูลลีจะใช้ฟังก์ชั่นความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้าที่หามาได้จากการทดลอง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงสมการของอัตราการไหลรวมผ่านช่องเปิดและสมการของระยะส่งลม โดยชุดสมการของการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิดที่พัฒนาขึ้นจากสมการพื้นฐานต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นได้แสดงไว้ในสมการ (4) ถึงสมการ (7)

สมการอนุรักษ์มวล

$$Q_1 = Q_2 + q_0 \tag{4}$$

สมการเบอร์นูลลี

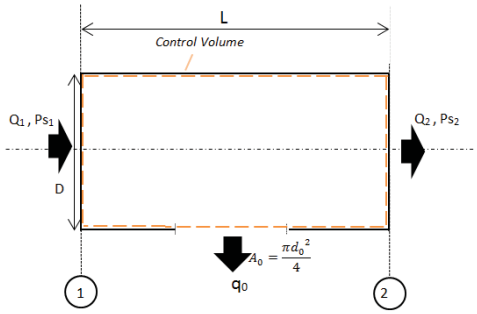
$$\left(P_{s,1} + \frac{8\rho {Q_1}^2}{\pi^2 D^4}\right) - \left(P_{s,2} + \frac{8\rho {Q_2}^2}{\pi^2 D^4}\right) = g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)\frac{L}{D}\frac{8\rho {Q_1}^2}{\pi^2 D^4} \tag{5}$$

อัตราการไหลรวมผ่านช่องเปิด[2]

$$q_0 = \overline{C_d}\left(\frac{\pi {d_0}^2}{4}\right)\sqrt{\frac{(P_{s,1} + P_{s,2})}{\rho}} \tag{6}$$

ระยะส่งลม[7]

$$\overline{T_{50}} = \frac{29.17(q_0)\sqrt{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}}{\left(\frac{\pi {d_0}^2}{4}\right)} \tag{7}$$



รูปที่ 5 แบบจำลองของการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิด

3.3 แบบจำลองการไหลผ่านข้อต่อ (Fitting)

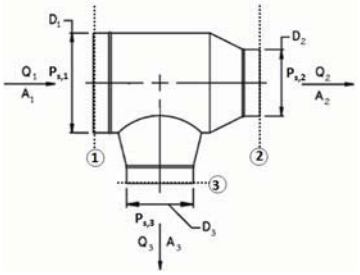
งานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองข้อต่อแยก SD5-10[8] มาเป็นส่วนต่อขยายสำหรับการไหลในระบบท่อลมผ้าดังรูปที่ 6 ซึ่งมีปริมาณลมของท่อย่อย (Q_3) แยกออกไป ทำให้อัตราการไหลขาออกลดลง การพิจาณาสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (K) ซึ่งเป็นผลจากลักษณะทางกายภาพของข้อต่อและอัตราการไหลจากตำแหน่ง 1 ไป i ใดๆ โดยที่ตำแหน่ง i เป็นตำแหน่ง 2 หรือตำแหน่ง 3 ก็ได้ จะขึ้นอยู่กับแนวท่อลมที่ผู้ออกแบบกำลังวิเคราะห์ ชุดสมการของการไหลผ่านข้อต่อแสดงไว้ในสมการ (8) และ (9)

สมการอนุรักษ์มวล

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \tag{8}$$

สมการเบอร์นูลลี

$$\left(P_{s,1}+\frac{8\rho Q_1{}^2}{\pi^2 D_1{}^4}\right)=\left(P_{s,i}+\frac{8\rho Q_i{}^2}{\pi^2 D_i{}^4}\right)+K_{1\to i}\left(\frac{Q_i}{Q_1},\frac{D_i}{D_1}\right)\frac{8\rho Q_i{}^2}{\pi^2 D_i{}^4} \quad (9)$$



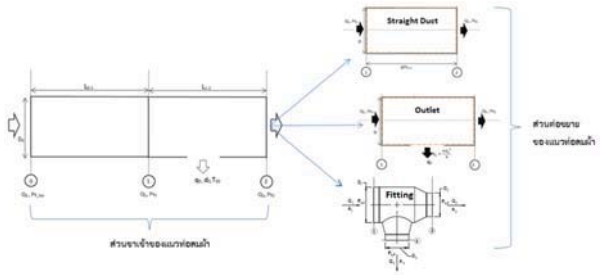
รูปที่ 6 แบบจำลองของการไหลผ่านข้อต่อแยก SD5-10

4. การวิเคราะห์ระบบท่อลมผ้า

ในการวิเคราะห์ระบบท่อลมผ้า จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาประกอบกัน เพื่อสร้างแนวท่อลมขึ้นมาในระบบท่อลม

แนวท่อลมที่ทำการวิเคราะห์จะถูกพิจารณาแยกเป็น 2 ส่วนคือส่วนขาเข้าของแนวท่อลมซึ่งเป็นส่วนของท่อลมที่ต่อจากพัดลม ส่วนนี้ประกอบด้วยท่อตรงและท่อที่มีช่องเปิด (รูปที่ 7)

ส่วนที่สองเป็นส่วนต่อขยายของแนวท่อลม โดยในส่วนนี้ แนวท่อลมอาจจะเป็นได้ทั้งท่อตรง ท่อที่มีช่องเปิด และส่วนที่เป็นข้อต่อ ดังรูปที่ 7 ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการออกแบบท่อลม การคำนวณจะกระทำเรียงลำดับกันไปในแต่ละส่วนตามแนวท่อลมนั้นจนจบแนวท่อลมนั้น ๆ



รูปที่ 7 แสดงส่วนขาเข้าและส่วนต่อขยายแนวท่อลมผ้า

จากผลการทดลองที่พบว่า ค่าความดันสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่มีการไหลผ่านช่องเปิด อันเนื่องมาจากขนาดท่อลมเท่าเดิมแต่ความดันจลน์ลดลง ดังนั้นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์การไหลในระบบท่อลมผ้าคือ วิธีความดันสถิตที่ได้คืนมา (Static Regain Method, $P_{s1} \le P_{s2}$) โดยกำหนดให้อัตราส่วนความดันสถิตเท่ากับค่าคงที่ C_{PR} [Constant Pressure Ratio, ($P_{s1}/P_{s2}=C_{PR}$)] ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่งเสมอ โดย $C_{PR}=1$ แสดงว่าเกิดความดันสถิตที่ได้คืนมาสมบูรณ์ และ $C_{PR} < 1$ แสดงว่าความดันสถิตที่ได้คืนเพิ่มขึ้น

วิธีความดันสถิตได้คืนนี้จะพิจารณาใช้กับแบบจำลองการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิดและการไหลผ่านข้อต่อ ในขณะที่แบบจำลองการไหลผ่านท่อตรง จะใช้วิธีการวิเคราะห์ที่คำนึงถึงความสูญเสียปกติ ทั้งนี้ อัตราการไหลของอากาศตามแนวท่อลมนั้นกำหนดได้จากความต้องการการปรับอากาศในพื้นที่ปรับอากาศ และความยาวของส่วนต่าง ๆ ในแนวท่อลมนั้นกำหนดได้จากการวางผังระบบท่อลมผ้าในบริเวณที่ต้องการการปรับอากาศ การแก้ระบบสมการของท่อลมส่วนขาเข้าและส่วนต่อขยายในแต่ละท่อน จะนำมาซึ่งผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ โดยคำตอบที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปโมโนแกรม (nomogram)

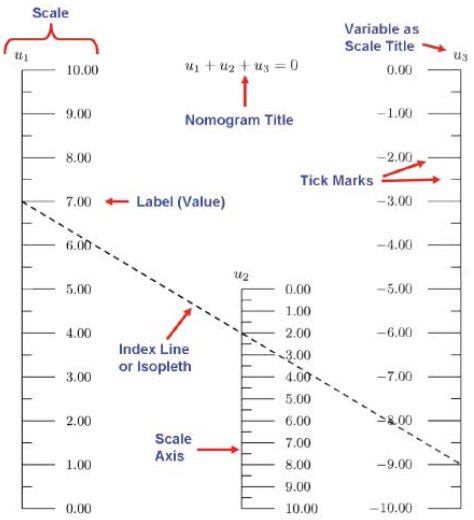
5. การออกแบบระบบท่อลมผ้าโดยใช้โนโมแกรม

โนโมแกรม(nomogram) หรือ โนโมกราฟ (nomograph) คือเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการคำนวณสำหรับสมการในระบบพิกัดฉาก โดยใช้สำหรับแก้สมการตั้งแต่สามตัวแปรขึ้นไปที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าเพียงตัวเดียว และแสดงในรูปแบบของช่วงสเกล (scale) ของตัวแปรนั้น

หลักการใช้งานของโนโมแกรม คือการแทนตัวแปรอื่น ๆ ที่ทราบค่าบนแกนเส้นตรงหรือเส้นโค้งซึ่งมีการปรับสเกลไว้แล้ว และลากเส้นตรงระหว่างจุดบนสเกลของตัวแปรทราบค่า โดยเรียกเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ที่ลากผ่านว่า Index Line หรือ Isopleth ซึ่งเส้นตรงที่ลากผ่านนี้จะไปตัดกับสเกลของตัวแปรไม่ทราบค่าและอ่านคำตอบของตัวแปรนั้นได้ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะสอดคล้องกับสมการของโนโมแกรม ดังรูปที่ 8

อย่างไรก็ตามการสร้างโนโมแกรมต้องมีความละเอียดและความแม่นยำอย่างมาก เพราะการวาดสเกลที่

ผิดพลาดแม้เพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้คำตอบคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นเพื่อความถูกต้องของการสร้างโนโมแกรมและนำไปใช้ในทางปฏิบัติ จึงสร้างด้วยโปรแกรมไพโนโม (PyNomo) ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Leif Roschier [10] บนภาษาไพทอน (Python) ที่มีความถูกต้องและนิยมใช้สำหรับสร้างโนโมแกรม



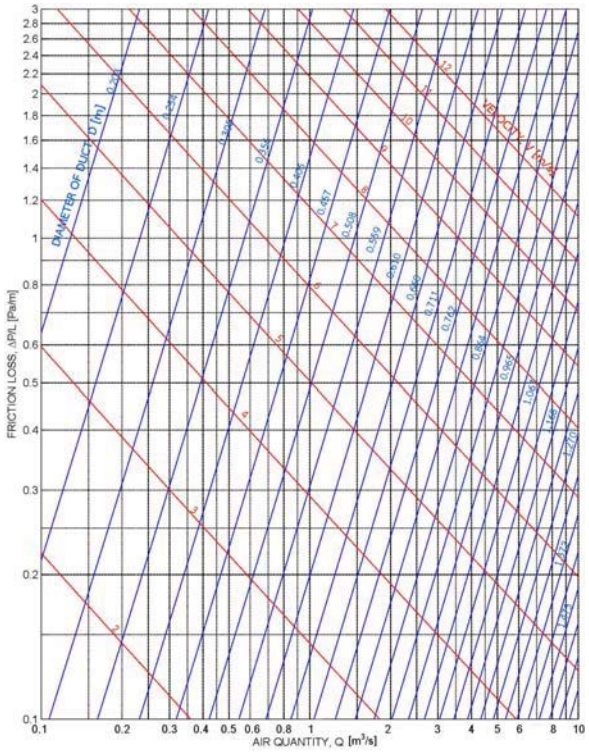
รูปที่ 8 แสดงแผนภาพและส่วนประกอบของโนโมแกรม[9]

5.1 โนโมแกรมของท่อตรง

โนโมแกรมส่วนท่อตรงใช้หาค่าความดันรวมลด (ΔP_t) หรือหาขนาดท่อตรง (D) ในส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้าเมื่อกำหนดความเร็ว (V) ที่เหมาะสมได้ เมื่อพิจารณาสมการเบอร์นูลี (3) โดยกำหนดคุณสมบัติของอากาศและวัสดุท่อ (ρ=1.14 kg/m^3, μ=1.86x10^{-5} kg/m-s, e=0.11 mm) จะจัดรูปตัวแปรได้ดังสมการ(10)

$$\left(\frac{\Delta P_t}{L}\right) = 0.231\left[log\left(\frac{2.973\times10^{-5}}{D}+\frac{2.269\times10^{-4}}{\left(\frac{Q}{D}\right)^{0.9}}\right)\right]^{-2}\frac{(Q)^2}{D^5} \qquad (10)$$

ค่าความดันรวมลดต่อความยาวจะขึ้นอยู่กับตัวแปร D และ Q ซึ่งสามารถแสดงโนโมแกรมส่วนท่อตรงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ด้วยกลุ่มข้อมูลที่คำนวณแล้วเสร็จจากขนาดท่อลมผ้าที่มีการผลิตและใช้กันในทางปฏิบัติคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.203-1.524 m (8 - 60 inch) และเลือกใช้ขนาดท่อลมผ้าที่เป็นเลขคู่ จากนั้นทำการแปรเปลี่ยนอัตราการไหล (Q) ซึ่งเป็นปริมาณที่ทราบค่าตั้งแต่ 0.1-10 m^3/s (≈212 – 21200 CFM) เมื่อแทนค่าตัวแปรทั้งสองลงสมการ (10) จะได้ค่าคำตอบ ΔP_t/L จากนั้นทำการเปลี่ยนขนาดท่อลมและอัตราการไหลจนครบตามขอบเขตที่กำหนด รวมทั้งพิจารณาสมการ Q=AV จะได้ความเร็วการไหลของแต่ละข้อมูลด้วย กลุ่มข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจะสามารถนำไปสร้างเป็นโนโมแกรมส่วนท่อตรงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 โนโมแกรมสำหรับการวิเคราะห์ในส่วนท่อตรง

5.2 โนโมแกรมของท่อที่มีช่องเปิด

การสร้างโนโมแกรมสำหรับท่อที่มีช่องเปิดจะต้องพิจารณาทั้งสมการเบอร์นูลลีและสมการอัตราการไหลผ่านช่องเปิด ซึ่งจะต้องแก้สมการทั้งสองไปพร้อมๆกัน ทำให้การวิเคราะห์จะครอบคลุม 2 แบบจำลองด้วยกันคือ

- แบบจำลองส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า ในส่วนนี้จะทราบอัตราส่วนความดันสถิต C_{PR} โดยการกำหนดขึ้นมา เพื่อหาค่าความดันสถิตขาเข้า P_{s1} และหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม d_0

- แบบจำลองท่อที่มีช่องเปิดของส่วนต่อขยาย ในส่วนนี้จะทราบความดันสถิตขาเข้า P_{s1} จากท่อนก่อนหน้าเพื่อหาค่า C_{PR} และหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม d_0

อย่างไรก็ตาม โนโมแกรมหนึ่งแผนภาพไม่สามารถหาค่าตัวแปรไม่ทราบค่า 2 ตัวได้ จึงต้องแบ่งการสร้างโนโมแกรมออกเป็น 2 ส่วนคือ โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ความดันสถิต และโนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม ซึ่งทั้งสองโนโมแกรมนี้จะมีความสอดคล้องของสมการซึ่งกันและกัน

5.2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสร้างโนโมแกรม

พิจารณาสมการเบอร์นูลลี (5) ด้วยการแทนค่า d_0 จากสมการอัตราการไหลผ่านช่องเปิด (6) เพื่อกำจัดตัวแปร d_0 ทิ้ง และแทนเงื่อนไขของอากาศและวัสดุท่อลมผ้าจะสามารถจัดรูปได้ดังสมการ (11)

$$P_{s,1}\left(1-\frac{1}{C_{PR}}\right)+c_1\left(Q_1,D,\Delta P_{t,straight},c_0\right) = c_2\left(Q_1,q_0,D,\Delta P_{t,straight}\right)\left(P_{s,1}\left(1+\frac{1}{C_{PR}}\right)\right)^{-1/4} \quad (11)$$

เมื่อ

$$c_0(Q_1,Q_2,D)=\frac{8\rho}{\pi^2}\left(\frac{{Q_1}^2-{Q_2}^2}{D^4}\right)$$

$$c_1\left(Q_1,D,\Delta P_{t,straig\,ht},c_0\right) = c_0+\left(0.52502log\left(0.673\frac{4\rho Q_1}{\pi\mu D}\right)-2.8287\right)\Delta P_{t,straig\,ht}$$

$$c_2\left(Q_1,q_0,D,\Delta P_{t,straig\,ht}\right) = \sqrt{(q_0)\left(\frac{4\sqrt{\rho}}{\pi C_d}\right)}\frac{\left(0.09365log\left(0.673\frac{4\rho Q_1}{\pi\mu D}\right)-0.22182\right)}{D}\Delta P_{t,straig\,ht}$$

สมการ (11) นี้ประกอบไปด้วยตัวแปร P_{s1} , C_{PR} และฟังก์ชั่น c_1 กับ c_2 ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นทราบค่าสำหรับท่อลมกรณีใดๆ โดยทั้งหมดนี้อยู่ในรูปแบบของสมการที่สามารถนำไปสร้างเป็นโนโมแกรมได้

5.2.2 โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ความดันสถิต

เป็นการสร้างโนโมแกรมของสมการ (11) ซึ่งต้องหาค่าฟังก์ชั่น c_0 ,c_1 และ c_2 ก่อน ทำให้การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือโนโมแกรมสำหรับฟังก์ชั่น c_0 , โนโมแกรมสำหรับฟังก์ชั่น c_1, โนโมแกรมสำหรับฟังก์ชั่น c_2 และโนโมแกรมสำหรับสมการ (11)

โดยกำหนดสเกลของตัวแปรทราบค่าคือ Q_1 ตั้งแต่ 0.1-10 m^3/s (≈212 – 21200 CFM), Q_2 ตั้งแต่ 0-9 (≈0 – 19000 CFM) เนื่องจากการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิดจะมีค่า $Q_2 < Q_1$ เสมอ รวมทั้งท่อนสุดท้ายของแนวท่อลมเป็นปลายปิดจะมีค่า $Q_2=0$ และกำหนดสเกล q_0 ตั้งแต่ 0.1-5 m^3/s (≈212 – 10000 CFM) ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบปรับอากาศ ทั้งนี้ได้กำหนดสเกลของ D เป็นจำนวนเต็มคู่ตั้งแต่ 8 - 60 in (0.203-1.524 m) เช่นเดียวกับท่อตรง และกำหนดสเกลของ $\Delta P_{t,straight}$ ตั้งแต่ 0.1-15 Pa เนื่องจากการออกแบบท่อส่วนใหญ่นิยมใช้ค่าความดันรวมลดต่อความยาวเท่ากับ 0.8-1.0 Pa/m ซึ่งที่ความยาวท่อปกติมักจะไม่ทำให้ความดันรวมลดเกินกว่า 15 Pa

อย่างไรก็ตาม สเกลของ C_{PR} จะขึ้นอยู่กับ P_{s1} จึงกำหนดสเกลของ P_{s1} ตั้งแต่ 30-250 Pa (≈0.12-1.00 inWC) เนื่องจากท่อลมผ้าจะคงรูปได้ต้องมีความดันสถิตมากกว่าความดันสถิตตั้งต้นหรือมากกว่า 30 Pa รวมทั้งเป็นการไหลในระบบความดันต่ำ ซึ่งประสบการณ์ของผู้ผลิต DUCTSOX[11] พบว่าช่วงความดันสถิตของท่อลมผ้ามักอยู่ในช่วง 0.25-1 นิ้วน้ำ

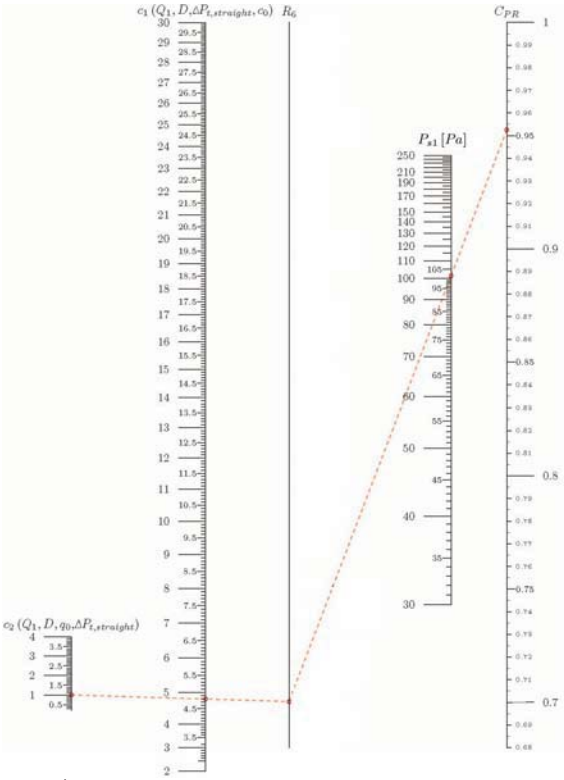
นำชุดคำสั่งไพโนโมมาสร้างเป็นโนโมแกรมของสมการ (11) ในช่วงของตัวแปรต่างๆดังกล่าวข้างต้น จะได้ดังรูปที่ 10 (สำหรับโนโมแกรมของฟังก์ชั่น c_0, c_1, c_2 สามารถดูรายละเอียดได้ในเอกสารอ้างอิง [4])

5.2.3 โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม

จากการวิเคราะห์ความดันสถิตด้วยโนโมแกรมรูปที่ 10 จะทราบค่า P_{s1} และ C_{PR} ทำให้สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม (d_0) ได้ โดยพิจาณาสมการอัตราการไหลผ่านช่องเปิด (6) เมื่อกำหนด C_d=0.65, ρ =1.14 kg/m^3 แล้วจัดรูปได้ดังสมการ (12)

$$d_0 = \sqrt{\frac{q_0}{0.47814\sqrt{P_{s,1}\left(1+\frac{1}{C_{PR}}\right)}}} \qquad (12)$$

นำชุดคำสั่งไพโนโมมาสร้างเป็นโนโมแกรมของสมการ (12) (รูปที่ 11) ในช่วงของตัวแปรเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.2



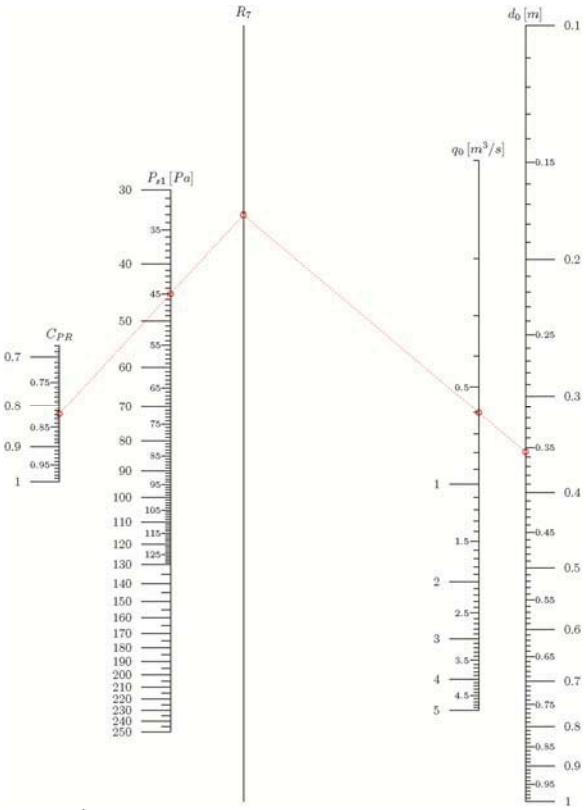
รูปที่ 10 โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ความดันสถิตของท่อที่มีช่องเปิด

5.3 โนโมแกรมของข้อต่อ

โนโมแกรมส่วนข้อต่อจะใช้สำหรับการหาขนาดท่อท่อนต่อไป เมื่อทราบขนาดท่อขาเข้าและอัตราส่วนปริมาณลมผ่านข้อต่อ เมื่อพิจารณาสมการเบอร์นูลี (8) ภายใต้เงื่อนไขความดันสถิตได้คืนสมบูรณ์ (P_{s1}=P_{si}) และจัดรูปตัวแปร พบว่าที่อัตราส่วนปริมาณลม (Q_i/Q_1) ค่าหนึ่งจะมีอัตราส่วน D_i/D_1 ที่ทำให้เกิดความดันสถิตได้คืนสมบูรณ์ ซึ่งสามารถเขียนสมการของการหาขนาดท่อท่อนต่อไปได้ของข้อต่อ SD5-10 ได้ดังสมการ 13 และ 14

ทิศ 1->2

$$D_2 = D_1\left(-0.4812\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 + 1.2691\frac{Q_2}{Q_1} + 0.2177\right) \qquad (13)$$



รูปที่ 11 โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวมของท่อที่มีช่องเปิด

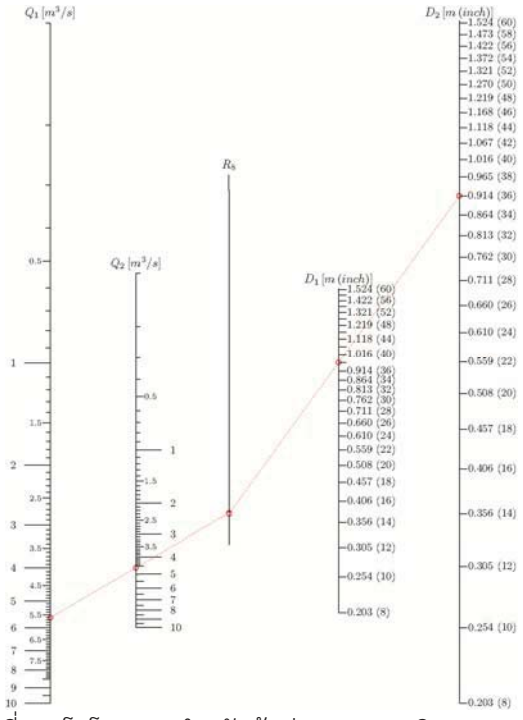
ทิศ 1->3

$$D_3 = D_1\left(-1.0872\left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)^2 + 1.9889\frac{Q_3}{Q_1} + 0.2639\right) \qquad (14)$$

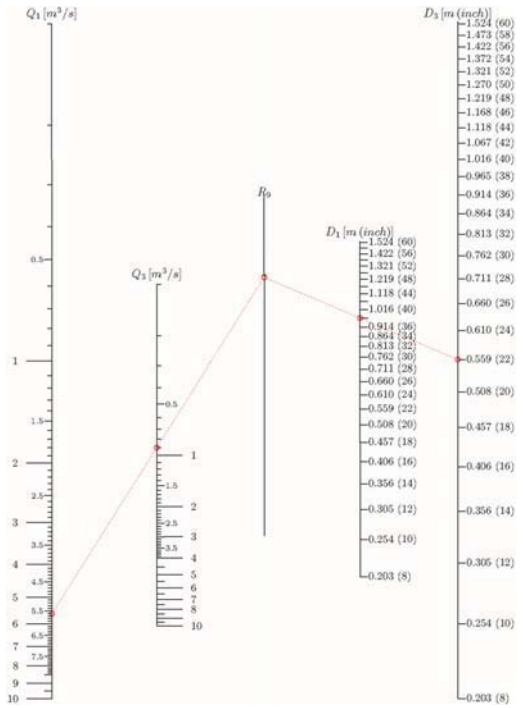
การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ทิศทาง โดยกำหนดสเกลของตัวแปรทราบค่า Q_1 ,Q_2 และ Q_3 ตั้งแต่ 0.1-1 0 m^3/s (≈212 – 21200 CFM) และ D_1,D_2,D_3 ตั้งแต่ 8-60 นิ้ว ซึ่งสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไพโนโมได้ดังตัวอย่างรูปที่ 12 และ 13

5.4 โนโมแกรมของการกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย

โนโมแกรมที่ได้จะใช้สำหรับการหาขนาดช่องเปิดย่อย (d) สำหรับท่อลมที่มีช่องเปิดท่อนใดๆ เมื่อทราบระยะส่งลม,อัตราการไหลผ่านช่องเปิดทั้งหมด (q_0) และเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม (d_0) โดยพิจารณาสมการของระยะส่งลม (6) ภายใต้เงื่อนไขความ



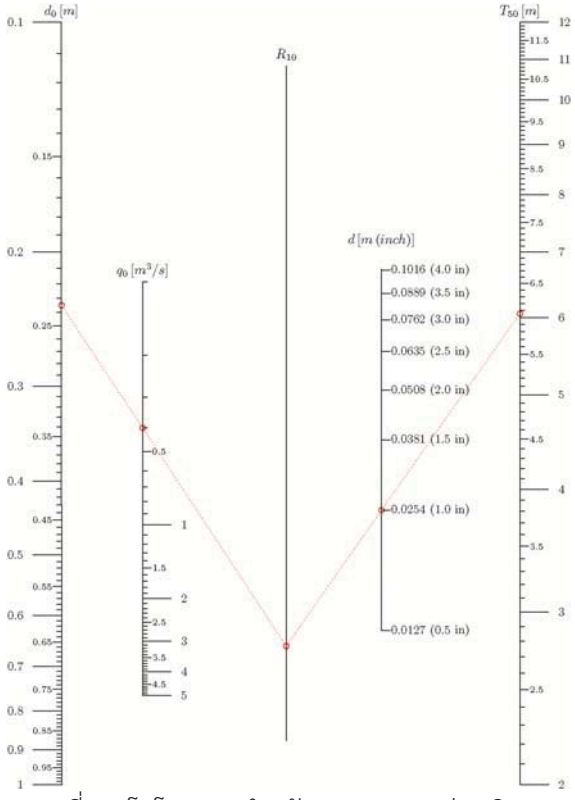
รูปที่ 12 โนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศทาง 1->2



รูปที่ 13 โนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศทาง 1->3

เร็วปลายทาง 50 FPM และกำหนดช่วงของระยะส่งลมตั้งแต่ 2-12 เมตร ซึ่งครอบคลุมการใช้งานสำหรับพื้นที่ปรับอากาศทั่วๆไป โดยสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไพโนโมดังรูปที่ 14 ทั้งนี้ โดยคำนึงว่าคำตอบขนาดของช่องเปิดย่อย (d) นั้นจะต้องเป็นค่าที่นิยมใช้ในการผลิตจริง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.5,1.0,...,4.0 นิ้ว

สำหรับจำนวนช่องเปิดทั้งหมดสามารถหาค่าได้จากสมการ [N= $(d_0/d)^2$]



รูปที่ 14 โนโมแกรมสำหรับการกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย (ความเร็วปลายทาง 50 FPM)

ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โนโมแกรมที่พัฒนาขึ้นมาในการออกแบบระบบท่อลมผ้าได้นำไปเปรียบเทียบกับการออกแบบท่อลมผ้าของผู้ผลิต DUCTSOX[11] พบว่า

1. ในส่วนของขนาดท่อลม การออกแบบโดยใช้โนโมแกรมจะมีขนาดมากกว่า เนื่องจากวิธีการของ DUCTSOX จะเป็นการกำหนดความเร็วท่อลมในแต่ละท่อนอิสระต่อกัน ในขณะที่ในโนโมแกรม ท่อลมทุกท่อนจะสัมพันธ์กันผ่านผลลัพธ์ที่ได้ในท่อลมท่อนก่อนหน้า

2. ความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลผ่านช่องเปิดจากท่อลมที่ได้จากวิธีของ DUCTSOX เมื่อมาคำนวณ พบว่ามีค่าลดลง ในขณะที่ท่อลมที่ได้จากโมโนแกรมจะมีค่าสม่ำเสมอมากกว่า
3. ขนาดของช่องเปิดที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีขนาดเท่ากัน แต่จำนวนช่องเปิดตามวิธีของ DUCTSOX จะมากกว่าอันเป็นผลมาจากข้อ 2

รายละเอียดในการวิเคราะห์ส่วนนี้สามารถหาได้ในเอกสารอ้างอิง [4]

6. สรุปผล

วิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้าที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสามดังกล่าวข้างต้นมาประกอบกัน โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้าและส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า คำตอบที่ได้ถูกนำเสนอในรูปโนโมแกรมต่าง ๆ เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการออกแบบระบบท่อลมผ้าทั้งระบบ ทำให้ได้ขนาดท่อลมท่อนต่างๆ, ขนาดช่องเปิดย่อย, จำนวนช่องเปิดย่อย, ขนาดข้อต่อและความดันสถิตที่พัดลมต้องใช้เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบท่อลมผ้าในทางปฏิบัติ ซึ่งทั้งหมดนี้อยู่บนเงื่อนไขของความคงรูปของท่อลม, ความดังของเสียงและระยะส่งลมที่เหมาะสม

อย่างไรก็ตาม โนโมแกรมที่นำเสนอถูกจำกัดการใช้งานในช่วงสเกลที่ระบุไว้เท่านั้น ซึ่งครอบคลุมการใช้งานโดยทั่ว ๆ ไปค่อนข้างมาก สำหรับการใช้งานนอกเหนือจากนั้นหรือการใช้งานเฉพาะนอกเหนือจากสเกลที่ระบุจำเป็นจะต้องไปใช้การแก้สมการต่าง ๆ ที่นำเสนอไว้ในบทความนี้ เพื่อหาคำตอบที่ถูกต้องต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Tas,I. and R.A.A. Bryant,1986, An Investigation of Flow Distributions in Perforated Pipes, 9th Australasian Fluid Mechanics Conference.

[2] El Moueddeb, K., S. Barrington, and N. Barthakur, 1997, Perforated Ventilation Ducts: Part 1, A Model for Air Flow Distribution. Journal of Agricultural Engineering Research, 68(1): p. 21-27.

[3] Lee, S., N. Moon, and J. Lee, 2012, A study on the exit flow characteristics determined by the orifice configuration of multi-perforated tubes. Journal of Mechanical Science and Technology, 26(9): p. 2751-2758.

[4]Taweephong Sirikuttanon, 2015. Development on fabric duct design method, Thesis (M.Eng), Chulalongkorn University.

[5] เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์ และทวีพงศ์ สิริคุตตานนท์, การศึกษาวิธีการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับท่อลมที่ทำจากผ้า, 28th ME-NETT, 15-17 ตุลาคม 2557, ขอนแก่น

[6] Miller, D.S., Internal Flow Systems. 1990: BHRA (Information Services).

[7] Mayes, C., et al., *Boundary-Layer Theory*. 2003: Springer Berlin Heidelberg.

[8] ASHRAE, 2013 ASHRAE Handbook: Fundamentals (IP & SI). 2013, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers.

[9] Doerfler, R. The Art of Nomography. 2008; available from:www.myreckonings.com/ wordpress

[10] Doerfler, R. Creating Nomograms with the Pynomo Software. 2009; Available from: http://pynomo.org/.

[11] DUCTSOX, DUCTSOX Engineering and Design Manual. 2014.

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

a คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องเปิด [m^2]

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อลม [m]

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด 1 ช่อง [m]

d_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม [m]

Q_i คือ ปริมาณลม ณ ตำแหน่ง i [m^3/s]

q_0 คือ อัตราการไหลผ่านช่องเปิด [m^3/s]

Re คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ [-]

e คือ ความขรุขระของผิววัสดุ [m]

f คือ Friction Factor [-]

μ คือ ความหนืดของของไหล [kg/m.s]

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล [kg/m^3]

T_{50} คือ ระยะส่งลมเฉลี่ย ที่ลมปลายทาง 50 FPM [m]

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ [m/s]

ΔP_t คือ ความดันรวมลด [Pa]

$\Delta P_{t,straight}$ คือ ความดันรวมลดกรณีท่อตรง [Pa]

$P_{s,i}$ คือ ความดันสถิตเกจ ณ ตำแหน่ง i

N คือ จำนวนรูเปิด [-]

L คือ ความยาวของท่อท่อนใดๆ [m]

C_{PR} คือ อัตราส่วนความดันสถิต Ps1 ต่อ Ps2