บทที่ 3

การออกแบบท่อลมด้วยวิธี T-Method

การออกแบบท่อลมด้วยวิธี T-Method ได้เกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1988 ตามแนวความคิดของ Tsal, Behls, และ Mangel ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการออกแบบโดยการพิจารณาหาระบบท่อลมที่เหมาะสมต่อการใช้งานที่มีประสิทธิภาพมาก

หลักสำคัญในการออกแบบด้วยวิธีนี้คือ จะทำการ Minimize สมการฟังก์ชันประสงค์ซึ่งเป็นสมการแสดง Life cycle cost ของระบบท่อลมในทุกขั้นตอนการคำนวณซึ่งมี 3 ขั้นตอน กระทำตามลำดับดังนี้

1. System condensing เป็นขั้นตอนการแทนระบบท่อลมทั้งหมดด้วยท่อลมจินตภาพเพียงเส้นเดียว ซึ่งมีลักษณะทางไฮดรอลิกส์ และราคาค่าใช้จ่ายในการสร้างเหมือนระบบเดิม

2. Fan selection เป็นขั้นตอนการหาความดันที่เหมาะสมของอุปกรณ์ส่งลมจากท่อลมจินตภาพ

3. System expansion เป็นขั้นตอนการกระจายท่อลมจินตภาพกลับสู่ระบบเดิม โดยกระจายตามความดันที่เหมาะสม ซึ่งก็จะได้ขนาดของท่อลมที่เหมาะสมด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>นิยามของปัญหา</u>

จุดประสงค์ของการออกแบบระบบท่อลมที่เหมาะสมต่อการใช้งานคือ การหาขนาดของท่อลม และการเลือกพัดลมเพื่อใช้ในการกระจายอากาศให้ได้ตามความต้องการ โดยมีค่าใช้จ่ายสำหรับการสร้างและการดำเนินการของระบบต่ำที่สุด สำหรับค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบท่อลม

ประกอบด้วย ต้นทุน, ภาษี, ค่าประกันภัย และค่าใช้จ่ายเพื่อการแก้ปัญหาอื่นๆ สำหรับค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของระบบได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้า, ค่าซ่อมบำรุง, ค่าจ้างคนงานควบคุมการทำงาน, ภาษีรายได้ และการขยายตัวของค่าใช้จ่ายต่างๆ

ดังนั้นการออกแบบระบบท่อลมที่เหมาะสม จึงเป็นการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่างๆ เหล่านี้กับค่าความดันรวมของพัดลมที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าใช้จ่ายดังกล่าวข้างต้นหลายอย่างเป็นอัตราซึ่งคงที่กับทุกๆระบบ และสามารถแยกออกจากการพิจารณาได้ ดังนั้นค่าใช้จ่ายที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบจึงมีเพียงต้นทุน, ค่าพลังงาน, คาบเวลา และอัตราการขยายตัวของค่าใช้จ่ายต่างๆ เท่านั้น

<u>ข้อจำกัดในการออกแบบ</u>

สำหรับข้อจำกัดโดยทั่วไปที่ใช้สำหรับพิจารณาออกแบบระบบท่อลมมีดังนี้

1. สมดุลของการไหลในระบบท่อ อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่จุดใดๆ ย่อมมีค่าเท่ากับอัตราการไหลออกจากจุดนั้นๆเสมอ (Kirchoff's first Law)

2. สมดุลความดันในระบบท่อ ความดันสูญเสียรวมในเส้นทางเดินท่อทุกสายในระบบจะต้องมีค่าเท่ากับความดันที่พัดลมสร้างขึ้น ข้อจำกัดนี้รวมถึง ความดันสูญเสียรวมในเส้นทางเดินท่อทุกสายที่ต่อจากจุดต้นทางใดๆ จะต้องมีค่าเท่ากันทุกสายด้วย (Kirchoff's Second Law)

3. การเลือกขนาดท่อลม ขนาดของท่อลมที่เหมาะสมที่สุดมักจะมีค่าเป็นตัวเลขทศนิยม ซึ่งไม่สะดวกในการสร้างหรือการผลิต ดังนั้นจึงควรกำหนดขนาดท่อที่จะใช้งานให้เป็นตัวเลขลงตัว โดยทั่วไปขนาดของท่อจะเพิ่มทีละ 1 นิ้วสำหรับท่อที่มีขนาดเล็กกว่า 20 นิ้ว และเพิ่มครั้งละ 2 นิ้ว สำหรับท่อที่มีขนาดตั้งแต่ 20 นิ้วขึ้นไป ซึ่งมาตรฐานนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต

4. การจำกัดความเร็วลม อากาศที่ไหลไปในท่อลมด้วยความเร็วที่สูงพอค่าหนึ่งจะก่อให้เกิดเสียงรบกวนขึ้นในท่อลม ดังนั้นการจำกัดความเร็วลมจึงถือเป็นข้อจำกัดที่จำเป็นที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบท่อลมเพื่อใช้ในงานปรับอากาศ

5. การกำหนดขนาดท่อบางส่วน ในระบบท่อลมที่ใช้งานจริงบางครั้งมีความจำเป็นต้องกำหนดขนาดของท่อบางส่วนในระบบขึ้นก่อนเพราะอาจมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เช่นบริเวณที่ติดตั้งท่อส่วนนั้นๆ มีจำกัด, เพื่อความสวยงาม, หรือเพื่อควบคุมความเร็วของอากาศภายในท่อเป็นต้น

6. ข้อจำกัดทางโครงสร้างของอาคาร ในทางปฏิบัติมักจะพบว่าที่ว่างสำหรับติดตั้งระบบท่อลมมีจำกัด เนื่องจากเหตุผลในการออกแบบทางสถาปัตยกรรม

7. ข้อจำกัดของอุปกรณ์ส่งลม ในทางปฏิบัติอุปกรณ์ส่งลมจะมีเฉพาะแบบที่โรงงานได้ทำการผลิตออกจำหน่ายเท่านั้น ดังนั้นจึงควรออกแบบระบบท่อลมให้เหมาะสมและสามารถใช้อุปกรณ์ส่งลมได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย

<u>ฟังค์ชั่นประสงค์ (Objective Function)</u>

สำหรับ สมการฟังก์ชันประสงค์ที่ได้มีการแนะนำไว้ คือ

$$E = E_p(PWEF) + E_s \tag{3.1}$$

โดยที่เทอม E_p คือเทอมของค่าไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบท่อลมแทนได้ด้วยสมการ

$$E_p = (Q_{fan})\frac{(E_c)Y + E_d}{10^3 \eta_f \eta_e}(P_{fan}) \tag{3.2}$$

เทอม PWEF คือตัวแปรที่ใช้สำหรับปรับค่าใช้จ่ายต่างๆในปีแรก ให้เป็นค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเทียบเป็นมูลค่าปัจจุบัน ซึ่งเรียกว่า Present Worth Escalation Factor

แทนด้วยสมการ

$$PWEF = \frac{[(1+AER)/(1+AIR)]^a - 1}{1-[(1+AIR)/(1+AER)]} \tag{3.3}$$

เทอม E_s คือค่าวัสดุ และค่าแรงงานที่ใช้ในการสร้างระบบท่อลมทั้งหมดแทนด้วยสมการ

$$E_s = S_d \pi\, DL \qquad \text{สำหรับท่อกลม} \qquad (3.4)$$

$$E_s = 2S_d(H + W)L \qquad \text{สำหรับท่อสี่เหลี่ยม} \qquad (3.5)$$

แทนค่าจากสมการ (3.2), (3.3), (3.4), และ (3.5) ลงในสมการ (3.1) จะได้สมการดังนี้

สำหรับท่อกลมเป็น

$$E = Z_1(P_{fan}) + S_d \pi\, DL \qquad (3.6)$$

สำหรับท่อสี่เหลี่ยมเป็น

$$E = Z_1(P_{fan}) + 2S_d(H + W)L \qquad (3.7)$$

โดย

$$Z_1 = (Q_{fan})\frac{E_c Y + E_d}{10^3 \eta_f \eta_e}(PWEF) \qquad (3.8)$$

จากการพิจารณาสมการ (3.7) และ (3.8) พบว่าตัวแปรที่อยู่ในสมการ คือขนาดของท่อและค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบท่อซึ่งมีความสัมพันธ์กันโดยสมการ Darcy-Weibach สำหรับท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยม ดังนี้

สำหรับท่อกลม

$$\Delta P = \left(\frac{fL}{D} + \Sigma C\right)\frac{V^2 \rho}{2g_c} \qquad (3.9)$$

สำหรับท่อสี่เหลี่ยม

$$\Delta P = \left(\frac{fL}{D_f} + \sum C\right)\frac{V^2 \rho}{2g_c} \qquad (3.10)$$

โดย f คือค่าตัวประกอบความเสียดทาน, ไม่มีหน่วย จาก ASHRAE Fundamentals Handbook (1993) กำหนดให้

สำหรับท่อกลม

$$f' = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{68}{Re}\right)^{0.25} \qquad (3.11)$$

สำหรับท่อสี่เหลี่ยม

$$f' = 0.11\left(\frac{\varepsilon}{D_f} + \frac{68}{Re}\right)^{0.25} \qquad (3.12)$$

โดย ถ้า $f' \geq 0.018 : f = f'$

หรือถ้า $f' < 0.018 : f = 0.85f' + 0.0028$

สำหรับท่อสี่เหลี่ยมตัวแปร D_f คือ Equivalent-by-friction diameter (Hydraulic diameter) หาได้จากความสัมพันธ์

$$D_f = \frac{2HW}{(H+W)} \qquad (3.13)$$

โดยใช้สมการความต่อเนื่อง

$$Q = VA \qquad (3.14)$$

และใช้สมการ aspect ratio สำหรับท่อสี่เหลี่ยม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$r = \frac{H}{W} \tag{3.15}$$

จะได้สมการความสัมพันธ์ต่าง ๆดังนี้

สำหรับท่อกลม

$$V = \frac{4}{\pi} QD^{-2} \tag{3.16}$$

สำหรับท่อสี่เหลี่ยม

$$V = \frac{Q}{HW} \tag{3.17}$$

หรือ

$$V = \frac{1}{r} QW^{-2} \tag{3.18}$$

และเมื่อพิจารณาความเร็วเทียบเท่าโดยให้สมการ (3.16) เท่ากับ (3.17) จะได้

$$W = 0.5\sqrt{\frac{\pi}{r}} D_v \tag{3.19}$$

สมการ (3.19) เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลมที่มีความเร็วเท่ากับท่อสี่เหลี่ยม, D_v (Equivalent-by-Velocity diameter) และจากสมการ (3.19) สามารถจัดรูปใหม่เป็น

$$D_v = 1.128\sqrt{HW} \tag{3.20}$$

กำหนดให้สำหรับท่อกลม

$$\mu = fL + \sum CD \tag{3.21}$$

และสำหรับท่อสี่เหลี่ยม

$$\mu = \left(\frac{fL}{D_f} + \sum C\right) D_v \qquad (3.22)$$

แทนค่าสมการ (3.20) ถึง (3.22) ลงในสมการ (3.9) และ (3.10) จัดรูปสมการใหม่จะได้

สำหรับท่อกลม

$$\Delta P = 0.811 g_c^{-1} \mu \rho Q^2 D^{-5} \qquad (3.23)$$

สำหรับท่อสี่เหลี่ยม

$$\Delta P = 0.811 g_c^{-1} \mu \rho Q^2 D_v^{-5} \qquad (3.24)$$

จากสมการ (3.23) และสมการ (3.24) สามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง D และ D_v ให้อยู่ในเทอมของความดันสูญเสียดังนี้

$$D = D_v = 0.959(\mu\rho)^{0.2} Q^{0.4} (g_c \Delta P)^{-0.2} \qquad (3.25)$$

จากนั้นพิจารณาสร้างสมการฟังก์ชันประสงค์ร่วมสำหรับท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยม โดยใช้สมการความสัมพันธ์หาเส้นผ่านศูนย์กลางท่อกลมที่มีค่าใช้จ่ายในการสร้างเทียบเท่ากับค่าใช้จ่ายในการสร้างท่อสี่เหลี่ยมที่พิจารณา, D_o(equivalent-by-cost diameter) ดังนี้

$$2(H + W) = \pi D_o \qquad (3.26)$$

แทนค่า W จากสมการ (3.19) ในสมการ (3.26) จะได้

$$D_o = \frac{1+r}{\sqrt{\pi r}} D_v \qquad (3.27)$$

แทนค่า D_v จากสมการ (3.25) ลงในสมการ (3.27) จะได้

$$D_o = \frac{2(H+W)}{\pi} = \frac{1+r}{\sqrt{\pi r}} 0.959(\mu\rho)^{0.2} Q^{0.4} (g_c \Delta P)^{-0.2} \qquad (3.28)$$

จากนั้นแทนค่า D จากสมการ (3.25) ในสมการ (3.4) สำหรับท่อกลม และ H+W จากสมการ (3.28) ในสมการ (3.5) สำหรับท่อสี่เหลี่ยมจะได้ค่า initial cost ดังสมการ

$$E_s = Z_2 K(\Delta P)^{-0.2} \qquad (3.29)$$

โดยที่

$$Z_2 = 0.959\pi \left(\frac{\rho}{g_c}\right)^{0.2} S_d \qquad (3.30)$$

และ

$$K = n\mu^{0.2} Q^{0.4} L \qquad (3.31)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ K คือ Duct characteristic และค่า n ในสมการ (3.31) สำหรับท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยม เป็นดังนี้

ท่อกลม $n = 1$ (3.32)

ท่อสี่เหลี่ยม $n = \frac{1+r}{\sqrt{\pi r}}$ (3.33)

สุดท้ายแทนสมการ (3.29) ในสมการ (3.6) และ (3.7) จะได้สมการฟังก์ชันประสงค์เป็น

$$E = Z_1(P_{fan}) + Z_2 K(\Delta P)^{-0.2} \qquad (3.34)$$

<u>การรวมระบบ (System Condensing)</u>

จากสมการ (3.34) พิจารณาท่อท่อนที่ i จะได้

$$E_i = Z_1 \Delta P_i + Z_2 K_i \Delta P_i^{-0.2} \qquad (3.35)$$

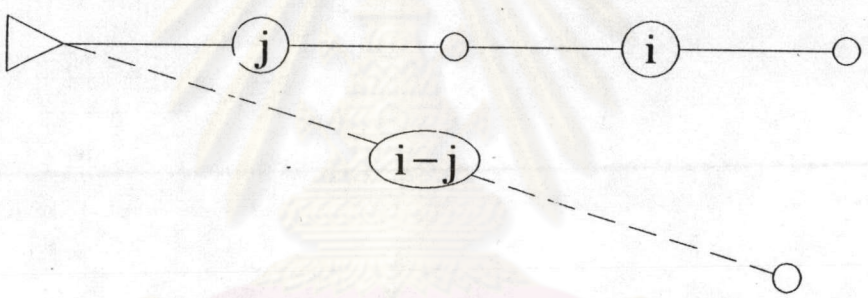
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาท่อท่อนที่ j จะได้

$$E_j = Z_1 \Delta P_j + Z_2 K_j \Delta P_j^{-0.2} \qquad (3.36)$$

พิจารณาระบบท่อ 2 ท่อนซึ่งประกอบกันแบบอนุกรมด้วยท่อ i และท่อ j ดังรูปที่ 3.1 จะได้สมการฟังก์ชันประสงค์ของระบบเป็น

$$E = E_i + E_j = Z_1(\Delta P_i + \Delta P_j) + Z_2(K_i \Delta P_i^{-0.2} + K_j \Delta P_j^{-0.2}) \qquad (3.37)$$



รูปที่ 3.1 แสดงการรวมระบบท่อลม 2 ท่อนที่ต่อกันแบบอนุกรม

Minimize ฟังก์ชันประสงค์ของระบบท่อ 2 ท่อน i-j นี้โดยเทียบกับ ΔP_i, ΔP_j ตามลำดับ จะได้

$$\frac{\partial (E_i + E_j)}{\partial (\Delta P_i)} = Z_1 - 0.2 Z_2 K_i \Delta P^{-1.2} = 0 \qquad (3.38)$$

$$\frac{\partial (E_i + E_j)}{\partial (\Delta P_j)} = Z_1 - 0.2 Z_2 K_j \Delta P_i^{-1.2} = 0 \qquad (3.39)$$

พิจารณาจากสมการ (3.38) และ (3.39) จะได้

$$K_i \Delta P_i^{-1.2} = K_j \Delta P_j^{-1.2} \qquad (3.40)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta P_i}{\Delta P_j} = \left(\frac{K_i}{K_j}\right)^{0.833} \tag{3.41}$$

ระบบท่อ 2 ท่อนซึ่งต่อกันแบบอนุกรมจะมีความดันสูญเสียรวมของระบบท่อเป็น

$$\Delta P_{i-j} = \Delta P_i + \Delta P_j \tag{3.42}$$

จากการแทนค่าในสมการ (3.41) ลงในสมการ (3.42) แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$\Delta P_i = \left(\frac{K_i^{0.833}}{K_i^{0.833} + K_j^{0.833}}\right) \cdot \Delta P_{i-j} \tag{3.43}$$

และ

$$\Delta P_j = \left(\frac{K_j^{0.833}}{K_i^{0.833} + K_j^{0.833}}\right) \cdot \Delta P_{i-j} \tag{3.44}$$

จากสมการ (3.29) เป็นสมการแสดงค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างท่อลม ดังนั้นระบบท่อลม 2 ท่อน i-j ใดๆ จะมีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้รวมเป็น

$$E_{si-j} = E_{si} + E_{sj} = Z_2(K_i \Delta P_i^{-0.2} + K_j \Delta P_j^{-0.2}) \tag{3.45}$$

แทนค่าจากสมการ (3.43) และ (3.44) ลงในสมการ (3.45) แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$E_{si-j} = Z_2\left(K_i^{0.833} + K_j^{0.833}\right)^{1.2} \Delta P_{i-j}^{-0.2} \tag{3.46}$$

สมมุติท่อ i-j เป็นท่อ 1 ท่อน ดังนั้นจะมีสมการแสดงค่าใช้จ่ายซึ่งเป็นผลจากปริมาณพื้นที่ผิวของท่อลมนี้จะเป็น

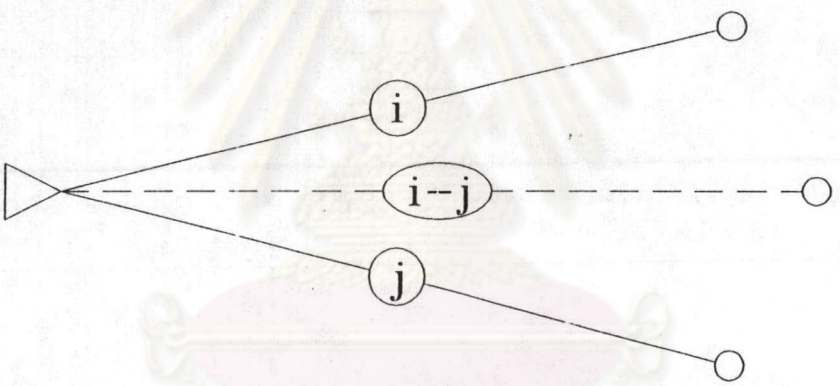
$$E_{si-j} = Z_2 K_{i-j} \Delta P_{i-j}^{-0.2} \tag{3.47}$$

จากการพิจารณาเปรียบเทียบสมการ (3.46) และ (3.47) พบว่าระบบท่อ 2 ท่อนใดๆ ที่ต่อกันแบบอนุกรมสามารถที่จะแทนได้ด้วยท่อจินตภาพเพียงท่อนเดียวหากท่อจินตภาพนั้นมีค่า

$$K_{i-j} = \left(K_i^{0.833} + K_j^{0.833}\right)^{1.2} \tag{3.48}$$

พิจารณาระบบท่อ 2 ท่อน i-j ซึ่งต่อกันแบบขนานดังรูปที่ 3.2 จะมีความดันสูญเสียรวมของระบบท่อนี้เป็น

$$\Delta P_{i-j} = \Delta P_i = \Delta P_j \tag{3.49}$$



รูปที่ 3.2 แสดงการรวมระบบท่อลม 3 ท่อนที่ต่อกันแบบขนาน

แทนค่าในสมการ (3.49) นี้ลงในสมการที่ (3.45) จะได้

$$E_{si-j} = E_{si} + E_{sj} = Z_2(K_i + K_j)\Delta P_{i-j}^{-0.2} \tag{3.50}$$

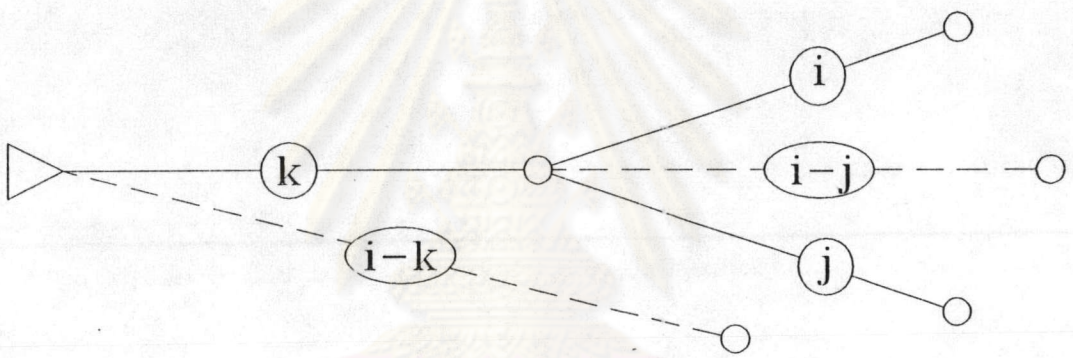
จากการพิจารณาเปรียบเทียบสมการ (3.50) และ (3.47) พบว่าระบบท่อ 2 ท่อนใดๆ ที่ต่อกันแบบขนานสามารถที่จะแทนได้ด้วยท่อจินตภาพเพียงท่อนเดียวหากท่อจินตภาพนั้นมีค่า

$$K_{i-j} = K_i + K_j \tag{3.51}$$

พิจารณาในทำนองเดียวกันหากมีท่อ n ท่อนต่อกันแบบขนานจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างท่อจินตภาพ กับระบบท่อเดิมเป็น

$$K_{1\text{-}n} = \sum_{i=1}^{n} K_i \qquad (3.52)$$

พิจารณาระบบท่อ 3 ท่อน i-j-k ต่อกันเป็นรูปตัวที โดยท่อ i ต่อกับท่อ j แบบขนาน จากนั้นจึงไปต่ออนุกรมกับท่อ k ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการรวมระบบท่อลม 3 ท่อนที่ต่อกันเป็นรูปตัวที

สามารถที่จะหาท่อจินตภาพของระบบนี้ได้ โดยการรวมท่อขนาน i-j ก่อนได้ความสัมพันธ์ (3.51) จากนั้นจึงนำไปรวมกับท่อ k แบบอนุกรมตามความสัมพันธ์ (3.48) ได้เป็น

$$K_{i\text{-}k} = \left((K_i + K_j)^{0.833} + K_k{}^{0.833} \right)^{1.2} \qquad (3.53)$$

พิจารณาระบบท่อประกอบด้วยท่อ o ท่อน ซึ่งมีท่อแยกเท่ากับ n ท่อ และมีท่อรวมท่อเป็นท่อ o เพียงท่อเดียว สามารถพิจารณาในทำนองเดียวกันได้สมการความสัมพันธ์เป็น

$$K_{i\text{-}o} = \left(\left(\sum_{i=1}^{n} K_i \right)^{0.833} + K_o^{0.833} \right)^{1.2} \qquad (3.54)$$

และจากสมการที่ (3.54) นี้สามารถที่จะนำไปใช้ในการยุบระบบท่อที่มีกิ่งก้านสาขามากๆ ลงเป็นท่อจินตภาพเพียงท่อนเดียวได้ โดยจะเริ่มทำการยุบจากท่อปลายทางเข้ามาหาต้นทาง ดังนั้น หากทำการยุบระบบท่อ n ท่อน เป็นท่อจินตภาพเพียงท่อนเดียวแล้ว ท่อจินตภาพที่ได้จะมีสมการฟังก์ชันประสงค์เป็น

$$E = Z_1 P_{fan} + Z_2 K_{1\text{-}n} P_{fan}^{-0.2} \qquad (3.55)$$

กระบวนการ Minimize สมการฟังก์ชันประสงค์ของระบบรวมพร้อมทั้งลดรูปของระบบรวมให้สามารถแทนได้ด้วยท่อจินตภาพเพียงท่อนเดียวนี้ เรียกว่ากระบวนการ System Condensing

<u>การหาขนาดของอุปกรณ์ส่งลมที่เหมาะสม (Fan selection)</u>

เมื่อได้สมการ (3.55) ซึ่งเป็นสมการแสดงระบบรวมแล้ว ก็จะสามารถเลือกความดันที่เหมาะสมสำหรับพัดลมที่จะใช้กับระบบท่อนี้ได้ โดยการ Minimize สมการ (3.55) นี้เทียบกับค่า P_{fan} ดังนี้

$$\frac{\partial E}{\partial P_{fan}} = Z_1 - 0.2 Z_2 K_{1\text{-}n} P_{fan}^{-1.2} = 0 \qquad (3.56)$$

จัดรูปใหม่ได้

$$P_{fan}^{opt} = 0.26\left(\frac{Z_2}{Z_1} K_{1-n}\right)^{0.833} + \Delta P z_{max} \qquad (3.57)$$

โดยที่ ΔPz_{max} คือค่าความดันสูญเสียซึ่งเกิดจากการที่อากาศไหลผ่านอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในระบบท่อ เช่นแผงกรองอากาศ เป็นต้น และจะไม่มีผลต่อการแปรเปลี่ยนของค่าความดันเหมาะสมในสมการนี้ กระบวนการหาค่าความดันเหมาะสมนี้เรียกว่า กระบวนการ Fan Selection

<u>การกระจายระบบ (System expansion)</u>

ถึงแม้ว่าจะได้ค่าความดันที่เหมาะสมของอุปกรณ์จ่ายลมแล้วก็ตาม แต่ถ้าหากนำไปใช้กับระบบท่อที่ไม่มีการกระจายของค่าความดันที่เหมาะสม จะมีผลทำให้ระบบที่ได้ทำงานอย่างไม่มี

ประสิทธิภาพ ดังนั้นกระบวนการพิจารณาเลือกขนาดของท่อลมซึ่งมีการกระจายค่าความดันที่เหมาะสมจึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมาก

ในการพิจารณาจะเริ่มจากการพิจารณาสมการของท่อจินตภาพที่ได้จากกระบวนการ System Condensing โดยจะทำการกระจายออกไปตามแนวของระบบท่อเดิมก่อนกระบวนการ System Condensing

พิจารณาระบบท่อที่ต่อกันแบบอนุกรมก่อนกระบวนการรวมระบบ (System Condensing) และเพื่อป้องกันความสับสนในที่นี้จะแทนท่อจินตภาพ, ท่อต้นทาง, และ ท่อปลายทาง ด้วยตัวห้อย root, up, และ down ตามลำดับ

จากสมการที่ (3.48) จะได้

$$K_{root} = (K_{up}^{0.833} + K_{down}^{0.833})^{1.2} \tag{3.58}$$

จัดรูปใหม่ได้

$$K_{down} = (K_{root}^{0.833} - K_{up}^{0.833})^{1.2} \tag{3.59}$$

โดยการกระจายค่าความดันที่เหมาะสมจะต้องเป็นไปตามสมการที่ (3.41) ดังนี้

$$\frac{\Delta P_{up}}{\Delta P_{down}} = \left(\frac{K_{up}}{K_{down}}\right)^{0.833} \tag{3.60}$$

แทนค่าจากสมการ (3.59) ลงในสมการ (3.60) จะได้

$$\frac{\Delta P_{up}}{\Delta P_{down}} = \frac{K_{up}^{0.833}}{K_{root}^{0.833} - K_{up}^{0.833}} \tag{3.61}$$

จากเงื่อนไขของระบบท่อที่ต่อกันแบบอนุกรม

$$\Delta P_{root} = \Delta P_{up} + \Delta P_{down} \tag{3.62}$$

แทนค่าจากสมการ (3.61) ลงในสมการ (3.62) แล้วจัดรูปใหม่ จะได้

$$\frac{\Delta P_{up}}{\Delta P_{root}} = \left(\frac{K_{up}}{K_{root}}\right)^{0.833} \tag{3.63}$$

กำหนดให้

$$T_{up} = \left(\frac{K_{up}}{K_{root}}\right)^{0.833} \tag{3.64}$$

ดังนั้นจึงสามารถหาค่า ΔP_{up} ได้จากสมการ (3.63) และสมการ(3.64) เป็น

$$\Delta P_{up} = T_{up} \Delta P_{root} \tag{3.65}$$

และสามารถหาค่า ΔP_{down} ได้จากสมการ (3.62) เป็น

$$\Delta P_{down} = \Delta P_{root} - \Delta P_{up} \tag{3.66}$$

พิจารณาระบบท่อที่ต่อกันแบบขนานก่อนกระบวนการรวมระบบ (System Condensing) โดยแทนท่อจินตภาพ, และท่อขนาน ด้วยตัวห้อย root, และ br ตามลำดับ พบว่าท่อขนาน n ท่อใดๆ เมื่อนำมาหาท่อจินตภาพแล้ว การกระจายค่าความดันสูญเสียที่เหมาะสม จะต้องได้ค่าความดันสูญเสียของท่อจินตภาพ และท่อขนานมีค่าเท่ากันทุกท่อน ดังสมการ

$$\Delta P_{root} = \Delta P_{br1} = \Delta P_{br2} = \ldots = \Delta P_{brn} \tag{3.67}$$

โดยการใช้สมการ (3.65) ถึง (3.67) จะสามารถกระจายค่าความดันสูญเสียรวมออกสู่ระบบเดิมอย่างเหมาะสม

เมื่อได้ค่าความดันสูญเสียของท่อในแต่ละท่อนแล้ว สามารถที่จะหาค่าของขนาดของท่อที่จะก่อให้เกิดค่าการกระจายความดันที่เหมาะสมได้โดยใช้สมการ (3.28)

เงื่อนไขบังคับในการหาภาวะเหมาะสม (Constrained Optimization)

กฎข้อที่ 1 และ 2 ของ Kirchoff เป็นเงื่อนไขบังคับที่ถูกใช้ในกระบวนการของ T-Method จากการพิจารณาข้างต้น ซึ่งนอกจากกฎทั้ง 2 ข้อนี้แล้วในขณะที่ทำการคำนวณหากมีข้อจำกัดอื่นๆ เช่น ข้อจำกัดเกี่ยวกับความเร็วของอากาศ และสถานที่ติดตั้ง เป็นต้น

เมื่อมีเงื่อนไขเหล่านี้อาจจะมีความจำเป็นต้องกำหนดขนาดของท่อลมส่วนนั้นๆขึ้นมาก่อนการคำนวณ ค่าความดันสูญเสียในท่อลมส่วนนี้จะถูกคำนวณขึ้น และถูกพิจารณาให้เป็นความดันสูญเสียส่วนที่เพิ่มเข้าไปในระบบ (นอกเหนือจากค่าความดันสูญเสียเนื่องจากท่อลม) เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์อื่นๆที่อยู่ในท่อลมส่วนใดๆ สำหรับเงื่อนไขบังคับเหล่านี้สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

1. การรวมระบบโดยมีความดันเพิ่ม

1.1 การรวมท่อลม 2 ท่อน i-j ที่ต่อกันแบบอนุกรม ความดันสูญเสียรวมเนื่องจากท่อลมที่ต่อกันแบบอนุกรมนั้น หากมีความดันสูญเสียเพิ่มในท่อท่อนใดก็ตาม จะต้องพิจารณารวมค่าความดันสูญเสียที่เพิ่มขึ้นนี้เข้าไปกับค่าความดันสูญเสียของท่อลมด้วยเสมอ

1.2 การรวมท่อลม 2 ท่อน i-j ที่ต่อกับแบบขนาน สำหรับท่อขนานที่แสดงในรูป 3.2 จะต้องแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ

1.2.1 ท่อท่อนที่ i ถูกกำหนดขนาดโดยมีความดันสูญเสียรวมเป็น ΔPz_i เพียงท่อนเดียว จากการสมดุลของความดัน ท่อลม 2 ท่อนที่ต่างขนานกันนี้จะต้องมีค่าความดันสูญเสียรวมเท่ากัน ดังนั้นจะได้ค่า $\Delta Pz_j = \Delta Pz_i$ ซึ่งไม่สามารถพิจารณาหาค่าภาวะเหมาะสมที่ท่อส่วนนี้ได้ และค่าความดันสูญเสียของท่อจินตภาพ i-j จะมีค่าเท่ากันกับ ΔPz_i

1.2.2 ท่อท่อนที่ i และ j มีความดันสูญเสียที่เพิ่มเข้าไปเป็น ΔPz_i และ ΔPz_j จะได้ว่าค่าความดันสูญเสียที่เพิ่มเข้าไปสำหรับท่อจินตภาพของระบบนี้ คือ

$$\Delta Pz_{i-j} = \max(\Delta Pz_i, \Delta Pz_j) \qquad (3.68)$$

1.3 <u>การรวมท่อ 3 ท่อน i-j-k ที่ต่อกันเป็นตัวที</u> สมมุติว่าแต่ละท่อนในรูป 3.3 มีค่าความดันสูญเสียที่เพิ่มเข้าไปเป็น ΔPz_i, ΔPz_j และ ΔPz_k โดยสมมุติฐานเดิมค่าความดันสูญเสียที่เพิ่มเข้าไปสำหรับท่อจินตภาพของระบบนี้คือ

$$\Delta Pz_{i-k} = \max(\Delta Pz_i, \Delta Pz_j) + \Delta Pz_k \qquad (3.69)$$

2. <u>การหาขนาดของอุปกรณ์ส่งลมที่เหมาะสม</u> (Fan selection) สามารถหาได้จากสมการ (3.57) เช่นเดิม

3. <u>การกระจายระบบโดยมีความดันเพิ่ม</u> ในกระบวนการกระจายระบบ ความดันสูญเสียของท่อลมในแต่ละท่อน คำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้เทียบกับความดันสูญเสียที่เพิ่มเข้าไป ซึ่งถูกเก็บไว้ในระหว่างกระบวนการรวมระบบ สมการเหล่านี้จะถูกดัดแปลงมาจากสมการ (3.65) ถึง (3.67) ดังนี้

สำหรับท่ออนุกรม

$$\Delta P_{up} = T_{up}(\Delta P_{root} - \Delta Pz_{root}) \qquad (3.70)$$

และ

$$\Delta P_{down} = (\Delta P_{root} - \Delta Pz_{up}) - \Delta P_{up} \qquad (3.71)$$

สำหรับท่อขนาน

$$\Delta P_{bri} = \Delta P_{root} - \Delta Pz_{bri} \qquad (3.72)$$

การรวมระบบ และการกระจายระบบที่มีเงื่อนไขบังคับในลักษณะนี้ ในขณะที่รวมท่อนั้นค่าสูงสุดของความดันเพิ่มจะถูกรวมเข้าไปและถูกเก็บไว้เป็นข้อมูลสำหรับแต่ละส่วนจินตภาพโดยแยกออกจากค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมระบบท่อลม, K เพื่อนำไปใช้ในการกระจายระบบต่อไป ดังนั้นการที่มีค่าความดันที่เพิ่มเข้าไปนี้ จึงไม่มีผลต่อการคำนวณหาขนาดของท่อลมที่เหมาะสมในขั้นตอนการกระจายระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณซ้ำ (Iteration)

จากที่ได้กล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดที่ผ่านมาพบว่า วิธี T- Method จำเป็นต้องใช้วิธีคำนวณซ้ำเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมระบบของท่อลมนั้นจะต้องทราบค่าขนาดของท่อลมมาก่อน ซึ่งในการคำนวณเริ่มต้นยังไม่มีการกำหนดขนาดของท่อลมเพราะนั่นคือสิ่งที่ต้องการหา

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสุ่มค่าขนาดของท่อลมขึ้นมาเพื่อทำการหาค่าดังกล่าว หลังจากนั้นจึงได้ค่าขนาดของท่อลมใหม่ออกมาในขั้นตอนการกระจายท่อลม ซึ่งจะเป็นค่าที่มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น และเมื่อนำค่าของขนาดที่ได้นี้กลับมาทำการคำนวณซ้ำอีกก็จะได้ค่าที่มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ผลลัพธ์ในที่สุด

สำหรับการกำหนดขนาดของท่อลมขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณในครั้งแรกนั้น ทำโดยการสมมุติค่าความเร็วในแต่ละส่วนของระบบท่อให้มีค่าเท่าๆกัน ยกเว้นกรณีที่มีข้อจำกัดของสถานที่ซึ่งต้องกำหนดขนาดท่อที่แน่นอน

วิธี T-Method เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง ตามปกติการคำนวณซ้ำเพียงไม่กี่ครั้ง ก็จะสามารถได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและมีความแม่นยำ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติอาจใช้การคำนวณเพียงสองถึงสามครั้งก็สามารถควบคุมการกระจายของความดันสูญเสียได้ตามที่ต้องการ

กระบวนการดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบท่อลมได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยเพื่อให้การคำนวณเป็นไปโดยอัตโนมัติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย