บทที่ 10

การออกแบบอุปกรณ์ระบบการทดสอบ

10.1 ท่อส่งอากาศ

ขนาดท่อส่งอากาศจะหาได้จากการกำหนดอัตราการไหลสูงสุดที่ต้องการ และค่าความเร็วอากาศที่เหมาะสม โดยการพิจารณาความดันสูญเสียในท่อประกอบ ขนาดท่อนี้สามารถหาได้จากการคำนวณ หรือใช้ไดอะแกรมความเสียดทานของท่อก็ได้ (12) เนื่องจากขอบข่ายการทดสอบนี้จะกระทำกับอุปกรณ์จ่ายอากาศขนาดโตที่สุด 16 นิ้วx16 นิ้ว ซึ่งต้องการอัตราการไหลประมาณ 1,500 CFM จะได้ขนาดท่อเส้นผ่าศูนย์กลางที่เหมาะสมที่สุด 12 นิ้ว ฟริคชั่นล็อส ประมาณ 0.33 นิ้วน้ำ/100 ฟุตท่อ ลักษณะสำคัญของท่อจะต้องใช้ประกอบกับการวัดอัตราการไหลได้คือ ผิวภายในท่อต้องเรียบ ความกลมควรเชื่อถือได้ขนาดหน้าตัดจะต้องมีค่าคงที่พอสมควร และถ้ามีรอยต่อจะต้องทำให้สนิทมาก จะได้ไม่มีการรบกวนการไหล การเลือกวัสดุท่อจึงเป็นปัญหาเหมือนกัน เพราะการใช้โลหะแผ่นบาง เช่น สังกะสี สเตนเลส หรือเหล็กแผ่น จะต้องมีการต่อรอยต่อที่ทำได้จะต้องเป็นตะเข็บนูนซึ่งยอมรับไม่ได้ อีกทั้งความกลมของท่อก็ไม่ค่อยจะแน่นอนมากนัก และเมื่อต้องการความยาวมากๆ ความตรงของท่อก็ไม่ดีนัก ท่อที่พิจารณาแล้วเป็นไปได้ ได้แก่ท่อเหล็กที่ผลิตจากโรงงานซึ่งมีตะเข็บรอยต่ออีก ถ้าจะเอาท่อแบบไม่มีตะเข็บซึ่งเป็นท่อใช้งานความดันสูงชนิดพิเศษนั้นก็พบปัญหา คือจะเป็นท่อหนาทั้งหมดส่งผลทำให้มีน้ำหนัก และราคาแพงมาก วัสดุอื่นที่พอจะยอมรับได้ก็มี ไฟเบอร์กลาส , P.E. และ P.V.C. ไฟเบอร์กลาสสามารถทำได้ราคาไม่ถูกนักเนื่องจากต้องมีแบบ และท่อที่ต้องการใช้นี้มีขนาดเล็กเกินไปที่จะทำท่อด้วยไฟเบอร์กลาสได้ในราคาถูกๆ แต่มีข้อดีที่การต่อทำได้ง่าย และน้ำหนักไม่มากนัก ส่วน P.E. นั้นสามารถอ่อนตัวได้เมื่อรับแรงมากๆ ราคาแพงกว่า P.V.C. สุดท้ายก็มาดู P.V.C. มีท่อสำเร็จผลิตใช้ในงานท่อน้ำคุณสมบัติผิว ความแข็งแรง ใช้ได้รวมทั้งการต่อก็พอที่จะทำได้ไม่ยากนัก หลังจากตรวจสอบดูหลายๆด้านแล้วท่อ P.V.C. ขนาด 10 นิ้ว พอเป็นไปได้มาก แต่ความเร็วในท่อจะสูงขึ้นประมาณ 40 เปอร์เซนต์ ซึ่งก็มีผลต่อระบบไม่มากนัก เราจะเลือกใช้ท่อ P.V.C. 10 นิ้ว ชั้นที่ 5 ขนาดภายใน 254 มิลลิเมตร ขนาดภายนอกท่อ 267 มิลลิเมตร เฉพาะในส่วนของท่อเข้าและท่อออกจากเครื่องมือวัดอัตราการไหล ท่อส่วนอื่น ๆ นอกจากนี้จะใช้เป็นท่อสังกะสีเบอร์ 24 หนา 0.55 มิลลิเมตร ทั้งหมด จากการคำนวณ ได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้ (ใช้ค่า KINEMATIC VISCOSITY AT 30 °C (ν) = $1.6*10^{-5}$ M^2/S = 0.01033 $FT^2/MIN.$)

ตารางที่ 7 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในระบบท่อทดสอบ

Q CFM	1,500	1,000	250
D IN	10	10	10
V FPM	2,750	1,834	458
R_{eD}	2.2×10^5	1.5×10^5	3.7×10^4
hf IN WG/100 FT			

10.2 แผ่นออริฟิซ

ในระบบการทดสอบจะต้องทำการควบคุมอัตราการไหลให้ได้ตามค่าที่ต้องการที่มีการกำหนดไว้ก่อนหน้านี้แล้ว วิธีการวัดค่าอัตราการไหล ที่ง่ายมีความเชื่อถือได้ เหมาะสมในด้านที่จะทำขึ้นใช้เองในราคาไม่แพงแล้วได้แก่ ออริฟิซ ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดในตอนต้นแล้ว เนื่องจากคุณสมบัติเด่นๆ เช่นมีค่าความดันสูญเสียสูงทำให้ลดความผิดพลาดจากการอ่านค่าความดัน และปัญหาความละเอียดของอุปกรณ์ขั้นที่ 2 ลงได้รวมทั้งระบบนี้ใช้ในการทดสอบ ไม่ได้เดินต่อเนื่องการสูญเสียความดันที่สูงไม่เป็นปัญหามากนัก ส่วนหัวฉีด และ เวนจูรี นั้นทำได้ยากราคาแพงอีกทั้งต้องการเครื่องวัดที่ละเอียดมากในการประกอบการอ่าน และความละเอียดในการวัดอัตราการไหลไม่ดีไปกว่าออริฟิซมากนัก ยิ่งต้องใช้กับระบบที่ค่าอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงถึง 6 เท่าตัว (250 CFM - 1500 CFM) ด้วยแล้วเป็นการยากต่อการออกแบบอย่างยิ่ง ในการออกแบบหาขนาดของแผ่นออริฟิซนี้จะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือการหาค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของอุปกรณ์ (β) ที่เหมาะสม และการหาขนาดของส่วนต่างๆของอุปกรณ์ โดยการออกแบบนี้จะเป็นไปภายใต้ข้อกำหนดของมาตราฐานเครื่องมือวัดอัตราการไหลทุกประการ

10.2.1 การหาอัตราการส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง (β) สมการหลักที่ใช้หาจะใช้สมการอัตราการไหล โดยการปรับรูปใหม่จะได้

$$\alpha\beta^2 = 4qv/\{\epsilon\pi D^2[2\Delta P/\rho]^{1/2}\} \qquad \text{.....(45)}$$

เนื่องจากขั้นต้นจะหาค่าประมาณก่อนจึงสมมติให้ ϵ = 1.00 และหาค่า ϵ จริงๆอีกครั้งเมื่อได้ค่า β ประมาณแล้วจากสมการ(45) เมื่อแทนค่า q_v , D , ρ และ กำหนดค่า ΔP ที่ต้องการ ก็จะได้ค่าคงที่ $\alpha\beta^2$

$$q_{v\ MAX} = 1500\ CFM = 0.707\ M^3/S$$
$$q_{v\ MIN} = 250\ CFM = 0.118\ M^3/S$$
$$\pi_{AIR30\ ^\circ C} = 1.165\ KG/M^3$$

กำหนดค่า ΔP สูงสุดประมาณ 100 มิลลิเมตร น้ำ (4 นิ้ว น้ำ) หรือ 86 M_{AIR} เมื่อแทนค่าที่อัตราการไหลสูงสุดจะได้

$$\alpha\beta^2 = 0.34$$

เลือกอุปกรณ์ขั้นต้นใช้จุดวัดความดันแบบ คอร์เนอร์ แทบปิ้ง จะได้ค่า β = 0.697 จากค่า β ที่ได้จากการแทนค่าที่อัตราการไหลสูงสุดนี้จะต้องตรวจสอบค่า ΔP ที่อัตราการไหลต่ำสุด ถ้าค่า ΔP อัตราการไหลต่ำสุดต่ำมาก จะทำให้การวัดความดัน (ΔP) มีความผิดพลาดสูง เมื่อแทนค่าที่อัตราการไหลต่ำสุดได้ ΔP_{MIN} = 2.78 มิลลิเมตร น้ำ ซึ่งเป็นค่าที่พอจะวัดได้แต่ความละเอียดไม่ดีนัก ค่าความผิดพลาดของการวัดจะทำการตรวจสอบภายหลังตรวจสอบค่า ϵ จากสมการ $\epsilon = 1-(0.41+0.35\beta^4)\Delta P/(KP_1)$ เมื่อ $P_2/p_1 \geqslant 0.75$

ค่า $P_1 = P_{ATM} + P_{FAN}$

P_{FAN} ที่ใช้ประมาณ 60 มิลลิเมตร น้ำ

P_1 = 10,336+60 = 10,396 มิลลิเมตร น้ำ

$P_2 = P_1 - \Delta P$ = 10,336 - 100 = 10,236 มิลลิเมตร น้ำ

ค่า P_2/P_1 = 0.985 ซึ่งมากกว่า 0.75 ตามเงื่อนไขข้อกำหนด สมการการขยายตัว(ϵ) จึงสามารถใช้ได้ตลอดช่วงโดยไม่ต้องทำการตรวจสอบค่า P_2/P_1 อีกต่อไป

$$\epsilon_{MAX\ FLOW} = 1-[0.41+0.35(0.7)^4]100/[1.4(10396)]$$
$$= 0.9966$$
$$\epsilon_{MIN\ FLOW} = 1-[0.41+0.35x(0.7)^4]2.78/[1.4(10396)]$$

$= 0.999$

$\epsilon_{MEAN} = 0.9978$

หรือถ้าให้ $\epsilon = 1.00$ จะทำให้ค่าความผิดพลาดบนค่าอัตราการไหล ±0.1 เปอร์เซนต์ เมื่อทำการคำนวณซ้ำหาค่าที่แน่นอนจะพบว่าได้ค่า $\beta = 0.66$ และได้ค่าต่าง ๆ ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 8

ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการออกแบบ ออริฟิซ

q_v (M^3/S)	0.707	0.118
V (M/S)	13.95	2.33
R_{eD}	2.2×10^5	3.69×10^4
E	1.1033	1.1033
ϵ	0.9967	0.9999
C	0.6055	0.6145
α	0.6680	0.6779
ΔP (MM.WG)	100	2.83

10.2.2 ขนาดส่วนต่างๆของออริฟิซ

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อทางเข้า (D)	254.0	มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูออริฟิซ (d)	167.6	มิลลิเมตร
ค่าอัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลาง (β)	0.66	

ความกว้างของร่องวงแหวน (a)	2.2 ±0.25	มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของร่องวงแหวน (b)	254.0	มิลลิเมตร
ความยาวของวงแหวนวัดความดันทางเข้า (c)	4	มิลลิเมตร
ความยาวของวงแหวนวัดความดันทางออก (c')	2.7	มิลลิเมตร
ความหนาของร่องวงแหวนวัดความดัน (f)	6.4	มิลลิเมตร
ความสูงห้องสมดุลย์ความดัน (g)	28	มิลลิเมตร
ความกว้างห้องสมดุลย์ความดัน (h)	40	มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูต่อวัดความดัน (J)	4.0	มิลลิเมตร
ความหนาของแผ่นออริฟิซ (E)	7.85 ±0.3	มิลลิเมตร
ความหนาของช่องออริฟิซ (e)	7.85 ±0.3	มิลลิเมตร

ขอบทางเข้าของออริฟิซ และทางออกออริฟิซเป็นมุมฉากคม

10.3 ความยาวท่อตรงสำหรับเครื่องวัดอัตราการไหล

ความยาวท่อตรงที่ทางเข้า และออกจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลมีผลสำคัญต่อค่าอัตราการไหลที่วัดได้ และเป็นปัญหาอันหนึ่งในการออกแบบท่อที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ค่าความยาวท่อตรงต่ำสุดที่ใช้ในการออกแบบนี้จะไม่ต้องมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์การไหล(±0% α)ซึ่งมีค่าคือ

ค่าความยาวท่อตรงที่ β = 0.65 และ ±0% บนค่า α
ทางด้านทางเข้าของอุปกรณ์มีความยาวต่ำสุด 22 D
ทางด้านทางออกของอุปกรณ์มีความยาวต่ำสุด 7 D
ค่าความยาวที่ออกแบบท่อจริงใช้กับออริฟิซ ค่า β = 0.66
ความยาวท่อตรงทางเข้าอุปกรณ์ 5,850 มิลลิเมตร หรือ 23 D
ความยาวท่อตรงทางออกอุปกรณ์ 1,800 มิลลิเมตร หรือ 7.08 D

10.4 ความไม่แน่นอนของการวัดอัตราการไหล

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าในทางปฏิบัติจริงๆนั้นมีหลายๆกรณีที่ไม่สามารถทำให้ได้ตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ทั้งหมดได้ จากสาเหตุนี้ทำให้มีความไม่แน่นอนของการวัดอัตราการไหลเกิดขึ้น ในที่นี้จะพยายามทำนายค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ หรือตัวประกอบในการคำนวณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และจากแหล่งที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนหลายๆแหล่งที่สำคัญได้แก่

a. ความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การไหล(α) เนื่องจากการเกิดระยะการเยื้องศูนย์ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของศูนย์กลางท่อกับศูนย์กลางของแผ่นออริฟิซ (e_x) ไม่เกิน 2.367

มิลลิเมตร จะทำให้เกิดความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การไหล $\delta\alpha/\alpha < \pm 0.003\%$ หรือ $\pm 0.3\%$ ของค่า α

b. ความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การไหลเนื่องจากการเลือกใช้ความยาวท่อช่วงตรงที่ทางเข้า และออกจากออริฟิซทำให้เกิดความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์การไหล $\delta\alpha/\alpha = 0.0\%$

c. ความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัว (EXPANSIBILITY FACTOR) ϵ จากการใช้ค่าสมการที่กำหนด ที่ค่า ΔP สูงสุด ทำให้เกิดความไม่แน่นอนบนค่า $\epsilon \pm 4\Delta P/P_1$ % $= 0.038$ % หรือ $\delta\epsilon/\epsilon < 0.0004$

d. ความไม่แน่นอนจากการวัดขนาดของท่อ(D) และขนาดช่องออริฟิซ(d) อันเกิดจากความเอียงของเครื่องมือวัด ความกลมของท่อ หรือรูออริฟิซ และความเปลี่ยนแปลงจากการเปลี่ยนของอุณหภูมิ มีค่าความละเอียดในการวัด ± 0.2 มิลลิเมตร

ดังนั้น

$\delta D/D = \pm 0.2/254 = \pm 0.0008$

$\delta d/d = \pm 0.2/167.6 = \pm 0.0012$

e. ความไม่แน่นอนจากการอ่านค่าความดันแตกต่างที่มาโนมิเตอร์ ซึ่งมีความละเอียดการอ่านไม่เท่ากันในแต่ละช่องของความดันทำให้เกิดความเบี่ยงเบนของค่า $\delta\Delta P/\Delta P$ แตกต่างกันในแต่ละช่องด้วย

3 MM.WG $< \Delta P <$ 20 MM.WG ความละเอียดการวัด ± 0.2 MM.WG $\delta\Delta P/\Delta P < 0.067$

20 MM.WG $< \Delta P <$ 50 MM.WG ความละเอียดการวัด ± 0.5 MM.WG $\delta\Delta P/\Delta P < 0.025$

$\Delta p >$ 50 MM.WG ความละเอียดการวัด ± 1.00 MM.WG $\delta\Delta P/\Delta P < 0.020$

f. ความไม่แน่นอนของค่าความหนาแน่นอากาศที่ทางเข้าออริฟิซ เนื่องจากการคำนวณจากสมการของแก๊ส $\rho_1 = P_1/RT_1$ ค่า P_1 และ T_1 มีค่าสูงรวมทั้งค่าการเปลี่ยนแปลงของ ρ_1 จึงต่ำมากจนสามารถตัดผลกระทบออกไปได้ $\delta\rho_1/\rho = 0.0\%$

g. ค่าอัตราส่วน $\beta^4/\alpha = 0.66^4/0.67 = 0.283$

ความไม่แน่นอนของการวัดค่าอัตราการไหลในระบบจะเป็นการรวมผลต่างๆทั้งหมดในตอนต้นใน

ทางปฏิบัติคำนวณได้จากสมการ

$$\delta q_m/q_m = [(\delta\alpha/\alpha)^2+(\delta\epsilon/\epsilon)^2+4(\beta^4/\alpha)^2(\delta D/D)^2+4(1+\beta^4/\alpha)^2 (\delta d/d)^2+(\delta\Delta P/\Delta P)^2/4+(\delta\rho_1/\rho_1)^2/4]^{1/2}$$

จากการคำนวณค่าเปอเซ็นความผิดพลาดของการวัดอัตราการไหลในช่วงต่าง ๆ จะได้ค่าตามตารางดังนี้

ตารางที่

ความละเอียดของการวัดอัตราการไหลด้วยออริฟิส

ความดันแตกต่าง(ΔP)	อัตราการไหล(CFM)	% ความผิดพลาด
3.75 - 20 MM.WG	250 - 570	< 3.38
20 - 50 MM.WG	570 - 910	< 1.32
> 50 MM.WG	> 910	< 1.09

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย