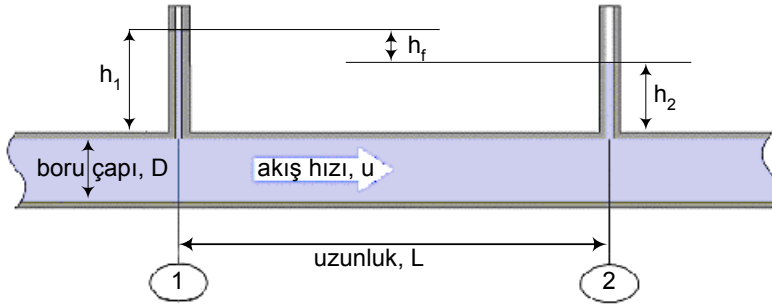


5. BORU HATLARI VE BORU BOYUTLARI

[\(Ref. e makaleleri\)](#)

Sıvılar

Bernoulli teoremine göre, bir akışkanın bir borudan akabilmesi için, aşağıdaki şekilde şematik olarak gösterildiği gibi, 1 noktasındaki enerjinin, 2 noktasındaki enerjiden daha fazla olması gerekir; aradaki enerji farkı, boru ve akışkan arasındaki sürtünme direncini yenmek için kullanılır.



Akan bir akışkanın toplam enerjisindeki değişiklik yükseklik kaybı, h_f (m) veya spesifik enerji kaybı, $g \cdot h_f$ (J/kg) terimleriyle ifade edilir.

Toplam enerji kaybı, L = boru uzunluğu (m), D = boru çapı (m), u = ortalama akış hızı (m/s), μ = akışkanın dinamik viskozitesi (kg/m.s = Pa.s), ρ = akışkanın yoğunluğu (kg/m³) ve k_s = boru duvarı pürüzlülüğüne (m) bağlıdır.

D'Arcy eşitliği, aşağıda görülen iki farklı formülle ifade edilmektedir.

$$h_f = \frac{4 f L u^2}{2 g D} \quad (a)$$

$$h_f = \frac{f L u^2}{2 g D} \quad (b)$$

h_f = sürtünmeden dolayı yükseklik kaybı, m

f = sürtünme faktörü, boyutsuz

L = uzunluk, m

u = akış hızı, m/s

g = yerçekim ivmesi, (9.81 m/s²)

D = boru çapı, m

(a) ve (b) eşitlikleri, sürtünme faktörü terimlerinin (f) farklı olmasıyla birbirinden ayrılır. (a) eşitliğinde SI birimleriyle hesaplanan sürtünme faktörü değeri kullanılırken, (b) de İngiliz birimleriyle hesaplanan f değeri kullanılır.

Sürtünme faktörü Moddy grafiğinden okunabilir, veya türbülent akımlar için aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir; ancak bu eşitliğin çözümü zordur, bu nedenle Moddy grafiği kullanımı tercih edilir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 3.48 - 1.74 \ln \left(\frac{2 k_s}{D} + \frac{9.3}{N_{RE} \sqrt{f}} \right)$$

f = sürtünme faktörü

k_s = mutlak boru pürüzlülüğü, m

D = boru çapı, m

N_{RE} = Reynolds sayısı, birimsiz

Genel olarak Reynolds sayısı 4000 – 100000 arasındaki türbülent akışkanlar için, SI (metrik) sistem birimlerine dayanan sürtünme kuvveti, yaklaşık olarak aşağıdaki (c) eşitliği ile, İngiliz sistemi birimleri için ise (d) eşitliği ile hesaplanır.

$$f \cong \frac{0.08}{\sqrt[4]{N_{RE}}} \quad (c)$$

$$f \cong \frac{0.03}{\sqrt[4]{N_{RE}}} \quad (d)$$

ÖRNEK:

Su, iç çapı 150 mm olan yatay bir borudan 45 m³/sa hızla 15°C de akmaktadır. Suyun hızını, sürtünme faktörünü ve birbirinden 1 km uzaklıkta olan iki nokta arasındaki basınç farkını hesaplayınız.

Çözüm:

$$\text{hız, m/s} = \frac{\text{hacim akış hızı, m}^3/\text{s}}{\text{kesit alanı, m}^2}$$

$$\text{hız, m/s} = \frac{45 \text{ m}^3/\text{s} \times 4}{3600 \text{ s/sa} \times \pi \times 0.15^2} = 0.71 \text{ m/s}$$

Sürtünme faktörü, akan sıvının Reynolds sayısına ve borunun içindeki relatif pürüzlülüğe (k_s) bağlıdır. Bu değerler hesaplanabilir.

Reynolds sayısı,

$$N_{RE} = \frac{\rho u D}{\mu}$$

N_{RE} = Reynolds sayısı

ρ = suyun yoğunluğu, 1000 kg/m^3

u = suyun hızı, 0.71 m/s

D = boru çapı, 0.15 m

μ = Suyun dinamik viskozitesi, $15^\circ\text{C} = 1.138 \times 10^{-3} \text{ kg/m s}$

$$N_{RE} = \frac{1000 \times 0.71 \times 0.15}{1.138 \times 10^{-3}} = 93585$$

Boru pürüzlülüğü, veya k_s değeri standart tablolardan alınır; ticari çelik boru için bu değer 0.000045 m olarak kabul edilebilir.

$$\text{relatif boru pürüzlülüğü} \left(\frac{k_s}{D} \right) = \frac{\text{boru pürüzlülüğü}}{\text{boru çapı}}$$

$$\text{relatif pürüzlülük} \left(\frac{k_s}{D} \right) = \frac{0.000045 \text{ m}}{0.15 \text{ m}}$$

$$\text{relatif pürüzlülük} = 0.0003$$

Sürtünme faktörü Moody grafiğinden okunur ve sürtünme yükseklik kaybı, ilgili D'Arcy eşitliğinden hesaplanır.

SI bazlı Moody grafiğinden,

$$k_s/D = 0.0003, N_{RE} = 93585, \text{ sürtünme faktörü, } f = 0.005$$

Avrupa D'Arcy eşitliği uygulandığında (Şekil-1),

$$h_f = \frac{4 \times f \times L \times u^2}{2 \times g \times D}$$

$$h_f = \frac{4 \times f \times L \times u^2}{2 \times g \times D} = \frac{0.05 \times 1000 \times 0.71^2}{2 \times 9.81 \times 0.15} =$$

$$h_f = 3.43 \text{ m yükseklik kaybı}$$

İngiliz sistemi bazlı Moddy grafiğinden (Şekil-2),

$k_S/D = 0.0003$, $N_{RE} = 93585$, sürtünme faktörü, $f \cong 0.02$

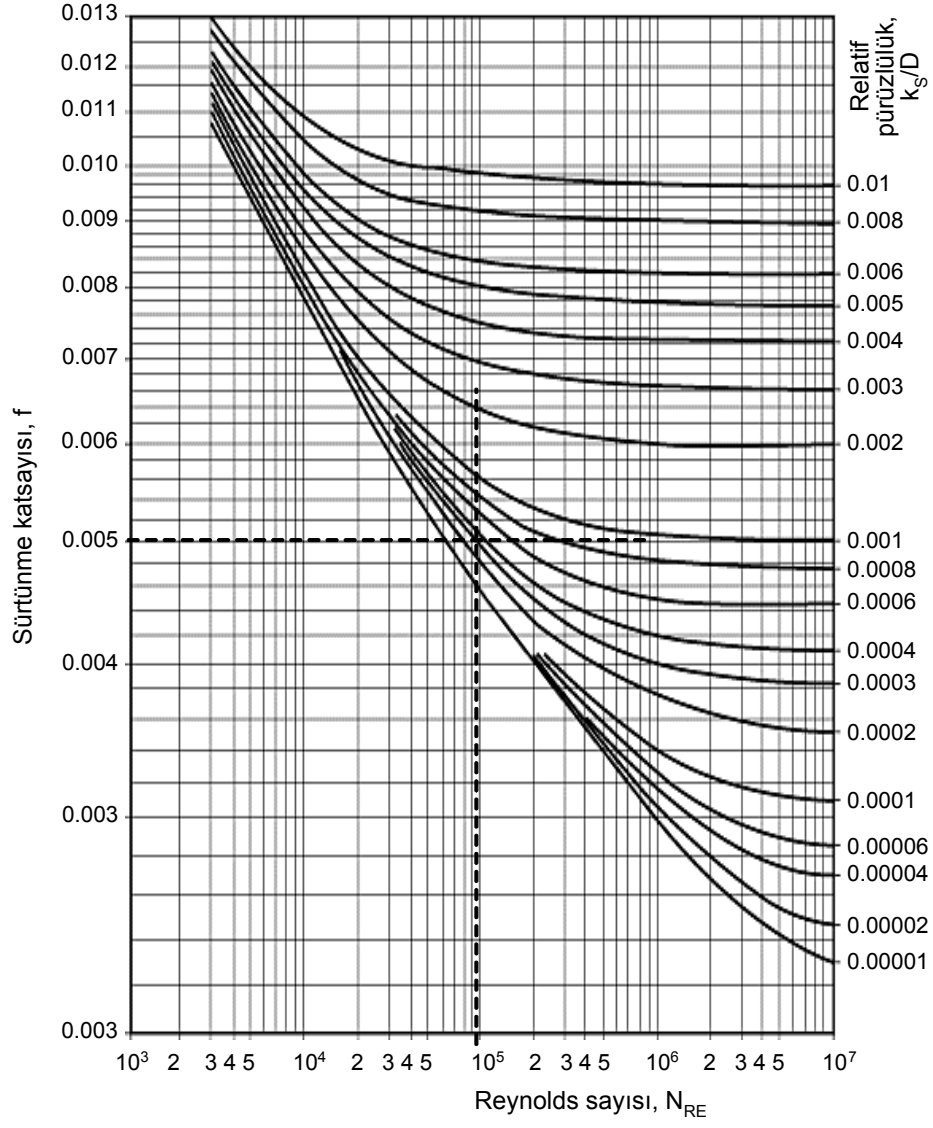
USA D'Arcy eşitliği uygulandığında,

$$h_f = \frac{f \times L \times u^2}{2 \times g \times D}$$

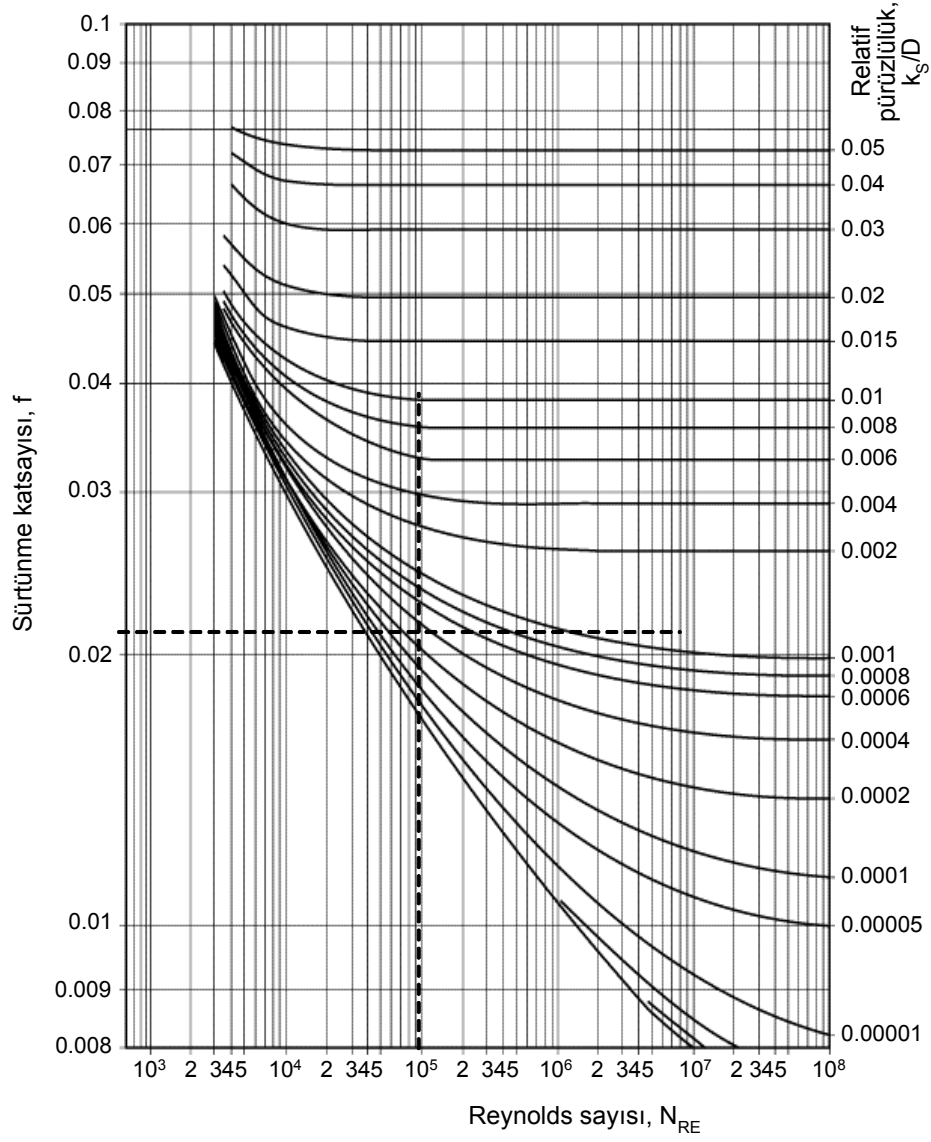
$$h_f = \frac{f \times L \times u^2}{2 \times g \times D} = \frac{0.02 \times 1000 \times 0.71^2}{2 \times 9.81 \times 0.15} =$$

$$h_f = 3.43 \text{ m yükseklik kaybı}$$

Görüldüğü gibi her iki eşitlik ve Moddy grafiği kullanılarak hesaplanan sürtünme yükseklik kaybı değerleri aynıdır.



Şekil-1: SI bazlı Moody grafiği



Şekil-2: İngiliz birimleri bazlı Moody grafiği

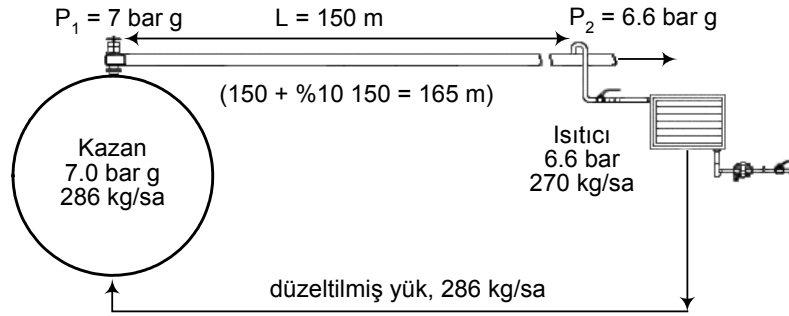
Buhar Boru Hatları ve Boru Çapı Tayini

ÖRNEK

Şekilde görülen sistemde ısıtıcı ünitesindeki buhar yükü 270 kg/sa tir.

a. Kazandan ısıtıcıya giden hattaki boru çapı ne olmalıdır?

a. Buharın akış hızı ne kadardır?



Çözüm:

Isıtıcıya sadece 270 kg/sa yük gerektiği halde boru hattındaki ısı kayıpları nedeniyle kazandan daha fazla buhar gelmesi gerekir.

Denemelere göre,

- Boru hattı 50 m den daha kısaysa bağlantı parçaları için %5 eklenmelidir.
- Boru hattı 100 m den daha uzunsu ve az sayıda ve genellikle düz bağlantı parçaları için %10 eklenmelidir.
- Boru hattı 100 m den daha uzunsu ve çok sayıda ve genellikle düz bağlantı parçaları için ilave edilecek miktar %20 ye kadar çıkar.

Buradaki örnekte düzeltilmiş uzunluk

$$L \text{ (düzeltilmiş)} = 150 \text{ m} + \%10 = 165 \text{ m}$$

Boru hattında olabilecek ısı kayıpları, düzeltilmiş boru hattının her 100 metresi için %3.5 kadar kabul edilir; yani, $(165/100) \times \%3.5 = \%5.8$

$$\text{Düzeltilmiş yük} = 270 \text{ kg/sa} \times \%5.8 = 286 \text{ kg/sa}$$

a. Sürtünme nedeniyle olan basınç kaybı 'basınç faktörü' denilen bir yöntemle de hesaplanabilir; bununla ilgili basınç – basınç faktörü (F) ve boru hattı kapasitesi – basınç faktörü (F) tabloları hazırlanmıştır.

$$F = \frac{F_1 - F_2}{L}$$

F = basınç faktörü

F₁ = giriş basıncındaki basınç faktörü F₂ = L m uzaklıktaki basınç faktörü

L = borunun eşdeğer (düzeltilmiş) uzunluğu, m

Basınç kaybı faktörü tablosundan (Tablo-8) P₁ ve P₂ için aşağıdaki değerler okunur.

P₁ = 7.0 bar g F₁ = basınç faktörü: 56.38 (Tablodan)

P₂ = 6.6 bar g F₂ = basınç faktörü: 51.05 (Tablodan)

$$F = \frac{F_1 - F_2}{L} = \frac{56.38 - 51.05}{165} = 0.032$$

Boru hattı kapasitesi-basınç faktörü (F) tablosundan (Tablo-9), F = 0.032 değerine en yakın değeri karşılayan boru çapı okunur. (tablodaki değerler doğrusal bir grafik vermediğinden, orantılamaya yapılamaz.)

F faktörü	Boru çapı, mm										
	15	20	25	32	40	50	65	80	100	150	200
	Kapasite, kh/sa										
0.025	10.99	33.48	70.73	127.3	209.8	459.7	834.6	1367	2970	8817	19332
0.030	12.00	36.78	77.23	137.9	229.9	501.1	919.4	1480	3264	9792	20917
0.040	14.46	44.16	93.17	169.2	279.5	600.7	1093	1790	3923	11622	25254

Tablodan F = 0.030 değeri kabul edilir.

F = 0.030 boru çapı = 40 mm ise kapasite = 229.9 kg/sa

F = 0.030 boru çapı = 50 mm ise, kapasite = 501.1 kg/sa

İstenilen kapasite 286 kg/sa olduğuna göre, uygun boru çapı 50 mm olmalıdır.

b.

Buharın akış hızı $u = ?$ m/s

Spesifik hacim, v_g

7 bar g = 0.8 Mpa a

$$P = 0.8 \text{ Mpa} \quad v_g = 0.24 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{Tablo-2})$$

Kütle akış hızı, $m^* = 286 \text{ kg/sa} = 0.08 \text{ kg/s}$

Volumetrik akış hızı, $V = m^* \times v_g$

Volumetrik akış hızı, $V = 0.08 \text{ kg/s} \times 0.24 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$V = 0.0193 \text{ m}^3/\text{s}$$

Boru çapı = 0.05 m

$$\text{buhar hızı, } u, \text{ m/s} = \frac{\text{volumetrik akış hızı, m}^3/\text{s}}{\text{borunun esit alanı, m}^2} = \frac{V}{A}$$

$$\text{buhar hızı, } u, \text{ m/s} = \frac{4 \times 0.0193 \text{ m}^3/\text{s}}{3.14 \times 0.0025 \text{ m}^2} = 9.8 \text{ m/s}$$

ÖRNEK

Çözüm:

Yukarıda verilen örnekteki verilerin geçerli olduğu varsayılarak nomogramı kullanarak basınç kaybını hesaplayınız.

Giriş basıncı = 7 bar g

Buhar kütle akış hızı = 286 kg/h

Minimum basınç $P_2 = 6.6$ bar g

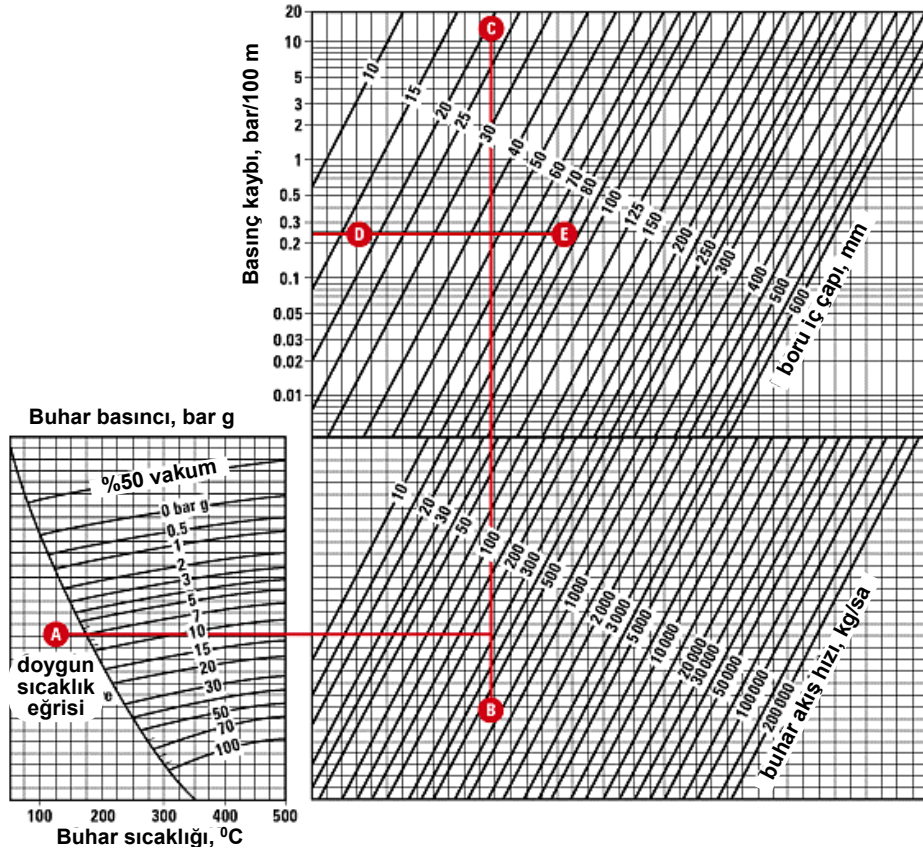
$$100 \text{ m için maksimum basınç kaybı} = \frac{P_1 - P_2}{L} \times 100$$

$$100 \text{ m için maksimum basınç kaybı} = \frac{7 - 6.6}{165} \times 100 = 0.24 \text{ bar}$$

Nomogramdan okuma (Şekil-3)

- *. Doygun buhar hattında 7 bar noktası bulunur —→ A
- *. A noktasından 286 kg/sa buhar kâkış hızına yatay bir hat çekilir —→ B
- * B noktasından nomogramın tepesine dikey bir hat çekilir —→ C
- *, Basınç kaybı skalasında 0.24 bar/100 m den yatay bir hat çekilir —→ DE
- *. DE ve BC hatlarının kesişme noktası boru çapını gösterir.

Bu örnekte 40 mm boru çapı çok küçüktür, 50 mm çap kullanılmalıdır.



Şekil-3: Buhar boru hattı çapı – basınç kaybı diyagramı

Buhar Hızına Göre Boru Çapı Tayini

Boru çapı tespitinde akışkanın hızı önemli bir etkidir. Genel olarak orta dereceli buhar için hız 25 – 40 m/s aralığına alınabilir; 40 m/s, uç bir hızdır ve buharda ıslaklık varsa korozyona neden olur. Uzun boru hatlarında hızın 15 m/s gibi daha düşük değerlerde tutulmasıyla yüksek basınç kayıplarından kaçınılır. 50 metreden daha uzun borularda, hız etkenine bağlı olmaksızın basınç kaybı kontrol edilmelidir.

Buhar hızına göre boru çapı tespiti hesapla veya tablolardan ve diyagramdan okunarak saptanabilir.

a. Hesaplama yoluyla boru çapının bulunması:

u = akış hızı, m/s

v_g = spesifik hacim, m³/kg

m^* = kütle akış hızı, kg/s

V = volumetrik akış hızı, m³/s = $m^* \times v_g$

$$\text{kesit alanı, } A = \frac{\text{volumetrik akış hızı, } V}{\text{akış hızı, } u}$$

$$\frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{V}{u} \quad D^2 = \frac{4 \times V}{\pi \times u}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times V}{\pi \times u}}$$

b. Tablo-7 deki verilerden yararlanılarak boru çapı bulunabilir.

P = buharın basıncı, bar g

u = akış hızı, m/s

m^* = kütle akış hızı, kg/sa

değerleriyle boru çapı bulunabilir.

ÖRNEK

Bir proseste 7 bar g basınçta 5000 kg/sa kuru doymuş buhar gerekmektedir. Akış hızının 25 m/s yi geçmemesi için boru çapı ne olmalıdır?

Çözüm:

7 bar g = 7 + 1 atm \cong 8 bar a = 0.8 Mpa

Akış hızı, u = 25 m/s Spesifik hacim, v_g

$$P = 0.8 \text{ Mpa} \quad v_g = 0.24 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{tablo-2 den})$$

Kütle akış hızı, $m^* = 5000 \text{ kg/sa} = 1.389 \text{ kg/s}$

Volumetrik akış hızı, $V = m^* \times v_g$

$$\text{Kesit alanı, } A = \frac{\text{Volumetrik akış hızı, } V}{\text{Akış hızı, } u} = \frac{m^* \times v_g}{u} =$$

$$\text{Kesit alanı, } A = \frac{1.389 \text{ kg/s} \times 0.24 \text{ m}^3/\text{kg}}{25 \text{ m/s}} = \frac{0.333 \text{ m}^3/\text{s}}{u}$$

$$\frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{1.333}{25} \quad D = 0.130 \text{ m} = 130 \text{ mm}$$

Buhar akış hızının 25 m/s yi geçmemesi istendiğinden boru çapı en az 130 mm olmalıdır; buna en yakın ticari boru olan 150 mm çaplı boru seçilir.

ÖRNEK:

Yukarıda verilen örnekteki verilerin geçerli olduğu varsayılarak nomogramı kullanarak minimum kabul edilebilir boru çapını bulunuz.

Çözüm:

Giriş basıncı = 7 bar g Akış hızı, u = 25 m/s

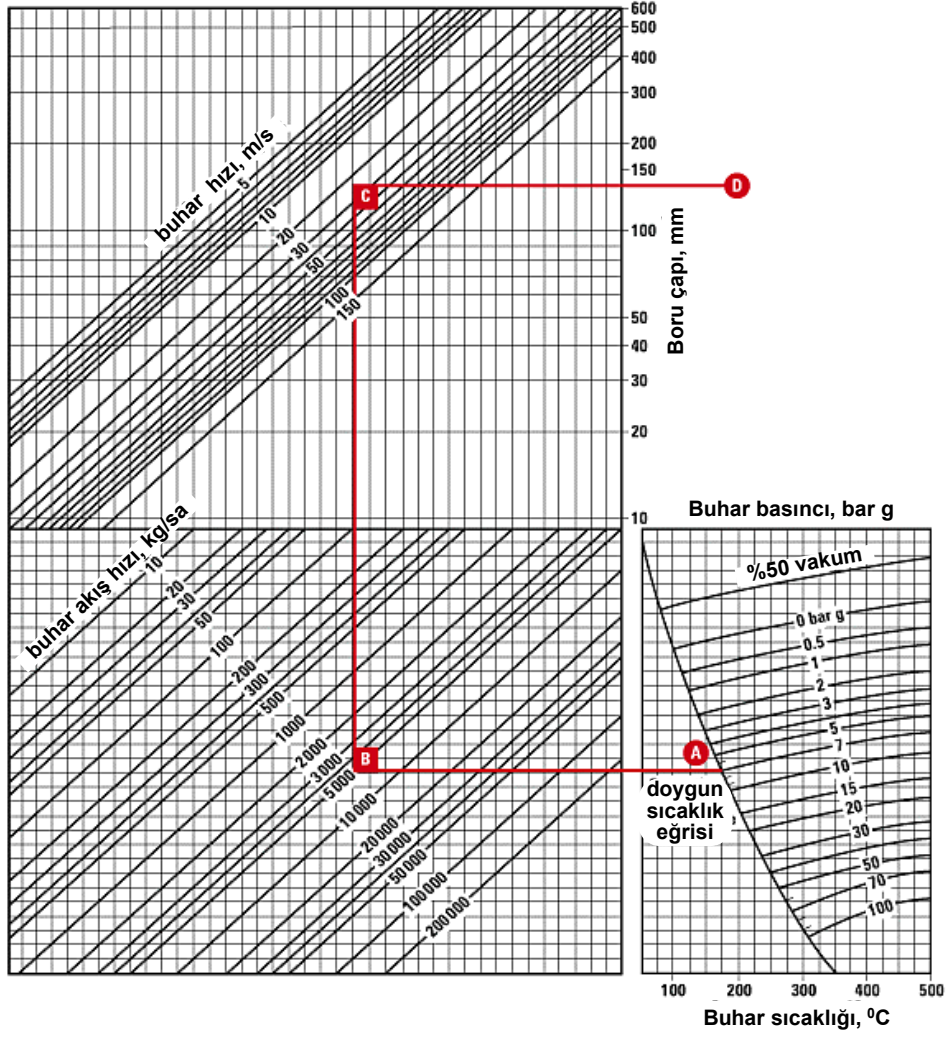
Kütle akış hızı, $m^* = 5000 \text{ kg/sa}$

Nomogramdan okuma (Şekil-4)

*. 7 bar g basınç eğrisinin doymuşluk sıcaklığını kestiği (A) noktadan, buhar kütle akış hızı olan 5000 kg/sa (B) noktasına yatay bir hat çekilir

*. B noktasından 25 m/s olan buhar hızı (C) noktasına dikey bir hat çizilir; C noktasından boru çapı skalasına çizilen yatay hattın skalayı kestiği nokta D dir.

Çapı 130 mm olan boru gerekmektedir; bu değere en yakın ticari boru çapı 150 mm olan borudur.



Şekil-4: Buhar boru hattı çapı – buhar hızı diyagramı

Kızgın buhar

Kızgın buhar kuru kurudur, nem içermez; dolayısıyla borularda erozyon olmaz. Bu nedenle, boru hattına basınç kaybı izin verdiği derecede, örneğin 50 – 70 m/s gibi yüksek hızlarda buhar gönderilebilir.

ÖRNEK

Bir prosesten çıkan atık ısı kullanılarak bir kazan/aşırı ısıtıcı vasıtasıyla, 50 bar g ve 450°C de 30 ton/sa kızgın buhar elde edilerek bir güç istasyonuna gönderilmektedir. Hız, 50 m/s değerini aşmamak koşuluyla,

- Boru çapının buhar hızına göre saptanabildiği nomogramdan (Şekil-4) boru çapını,
- Boru uzunluğu (düzeltilmiş) 200 m ise, basınç kaybını, boru çapı – basınç kaybı nomogramından (Şekil-3) bulunuz.

Çözüm:

- Şekil-4'deki nomogramda,

Sıcaklık ekseninde 450°C noktasından dikey bir hat çizilerek basınç eğrilerinden 60 bar eğrisini kestiği nokta işaretlenir → A

A noktasından sol tarafa yatay bir hat çekilir, kütle akış hızı 30 000 kg/sa (30 t/sa) skalası kestirilir → B

B noktasından yukarı dik bir hat çekilir, buhar hızı 50 m/s skalası kestirilir → C

C noktasından çizilen yatay hat iç boru çapı skalasına kadar uzatılır → D

boru çapı = 120 mm değeri okunur.

Aşağıdaki tabloya göre, borunun Sch 80 olduğu kabul edildiğinde, en yakın standart değer 150 mm lik boru olduğu, bunun da gerçek çapının 146.4 mm olduğu görülür.

Nominal çap, mm		15	20	25	32	40	50	65	80	100	150
Gerçek çap, mm	Sch 40	15.8	21.0	26.6	35.1	40.9	52.5	62.7	77.9	102.3	154.1
	Sch 80	13.3	18.9	24.5	32.5	38.1	49.2	59.0	73.7	97.2	146.4
	Sch 160	11.7	15.6	20.7	29.5	34.0	42.8	53.9	66.6	87.3	131.8

b. Şekil-3'deki nomogramda,

Sıcaklık eksenini üzerindeki 450°C noktasından dikey bir hat çizilerek basınç eğrilerinden 60 bar eğrisini kestiği nokta işaretlenir → A

A noktasından sağ tarafa yatay bir hat çekilir, kütle akış hızı 30 000 kg/sa (30 t/sa) skalası kestirilir → B

B noktasından yukarı dik bir hat çekilir, yaklaşık olarak 146 mm boru iç çapı skalası kestirilir → C

C noktasından sol tarafa çizilen yatay hatla basınç kaybı (bar/100 m) skalası kestirilir → D

basınç kaybı = 0.9 bar/100 m değeri okunur.

Örnekteki boru uzunluğu 200 m olduğuna göre basınç kaybı,

$$\text{basınç kaybı} = \frac{200 \text{ m}}{100 \text{ m}} \times 0.9 \text{ bar} = 1.8 \text{ bar}$$

Bu kadar basınç kaybı proses fabrikasında kabul edilebilir bir miktardır.

Basınç Kaybının Hesaplanmasında Deneysel Eşitlikler

Bu tür çalışmalarla iki deneysel eşitlik çıkarılmıştır. Eşitlikler, uzun yıllar denenmiş ve basınç faktörü metoduna çok yakın değerler elde edilmiştir. Bu formüller bilimsel hesap makinelerine yüklenerek tablo ve grafiklere bakma zorunluluğu kaldırılmıştır.

Basınç kaybı formülü 1

$$\Delta P = \frac{(P_1)^{1.9375} - (P_2)^{1.9375}}{L} = \frac{m^{1.853}}{0.011 D^{4.987}}$$

Basınç kaybı formülü 2: Boru uzunluğu en fazla, 200 m olabilir.

$$\Delta P = \frac{L \times v_g \times m^{\bullet}}{0.08 \times D^5}$$

P_1 = üst basınç, bar a

P_2 = alt basınç, bar a

D = boru çapı, mm

L = borunun uzunluğu, m

m^{\bullet} = kütle akış hızı, kg/sa

ΔP = basınç kaybı, bar)

v_g = buharın spesifik hacmi, m³/kg