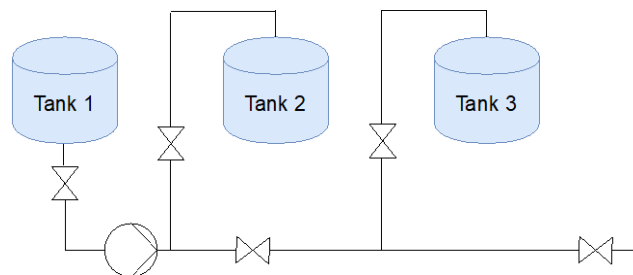


Eksempel 7-14. Trykfald i en proceslinje

Problem: I en proces skal en procestank (Tank 1 på 20 m³) tømmes over i to lagertanke (Tank 2 på 10 m³ og Tank 3 på 12 m³). For at kunne validere valg af en pumpe skal det tryk, som pumpen skal kunne levere under pumpning af produkt fra Tank 1 til de to lagertanke beregnes.

Data: Væsken er vand ved 20°C med densitet på 1000 kg/m³ og viskositet på 1,0·10⁻³ Pa·s. Pumpen er en centrifugalpumpe med en maksimal volumetrisk strømningshastighed på 20 m³/h og et arbejdsstryk på 3,15 bar. Produktionslinjen er skitseret nedenfor:



Rørføringerne:

- Mellem Tank 1 og pumpen er 3 meter 2" rør, en ventil og en 90° bøjning.
- Mellem pumpen og Tank 2 er den samlede længde af lige 2" rør 20 meter frem til ventilen (som også regnes som 2"), der er desuden et T-stykke som 90° bøjning. Efter ventilen er der 40 meter 1,5" rør og to 90° bøjninger. Tank 2's indløb er placeret i samme højde som Tank 1's udløb, da Tank 2 finde på etagen under Tank 1.
- Mellem pumpen og Tank 3 er den samlede længde af lige rør 50 meter 2" rør. Der er to ventiler på strækningen, et T-stykke som gennemstrømning, et T-stykke som 90° bøjning og to 90° bøjninger. Tank 3's indløb er placeret 4 meter over Tank 1's udløb.

Løsning: Tryktab i lige rør og fittings giver tilsammen det tryktab, der skal overvindes for at pumpe væsken fra Tank 1 til Tank 3.

Det samlede tryktab beregnes ud fra:

$$\triangleright \Delta P_{\text{samlet}} = \Delta P_{\text{rør}} + \Delta P_{\text{fittings}} + \Delta P_{\text{højdeforskel}} \text{ [Pa]}$$

For at beregne trykfaldet for røret skal det først bestemmes om strømmingen er laminar eller turbulent og derfor beregnes først middelhastigheden \bar{v} (ligning 28). Til dette benyttes den maksimale volumetriske strømningshastighed på 20 m³/h:

$$\triangleright \bar{v} = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot \pi \cdot (0,0243 \text{ m})^2} = 3 \text{ m/s}$$

Dernæst beregnes Reynolds tal (ligning 31) for at finde de rette ligninger til beregning af tryktab:

$$\triangleright Re = \frac{\bar{v} \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0486 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 145800$$

Strømmingen er altså turbulent og trykfaldet pr. meter bestemmes ud fra ligning 42 og 40:

$$\triangleright f = 0,048 \cdot Re^{-0,20} = 0,048 \cdot 145800^{-0,20} = 0,00445$$

$$\rightarrow \frac{\Delta P}{L} = \frac{32 \cdot \bar{v}^2 \cdot \rho}{D \cdot \frac{16}{f}} = \frac{2 \cdot f \cdot \bar{v}^2 \cdot \rho}{D} = \frac{2 \cdot 0,00445 \cdot (3 \frac{m}{s})^2 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}}{0,0486 m} = 1648 \frac{Pa}{m} = 0,01648 \frac{bar}{m}$$

Den samlede ækvivalente længde fra fittings mellem pumpen og Tank 3 er:

$$\rightarrow L_e = (2 \cdot 10 + 1 \cdot 20 + 1 \cdot 60 + 2 \cdot 35) \cdot 0,0486 m = 8,3 m$$

Derfor er den samlede længde til beregning af trykfaldet:

$$\rightarrow L = L_{rør} + L_e = (50 + 8,3) m = 58,3 m$$

Trykfaldet bliver dermed:

$$\rightarrow \Delta P = 0,01648 \frac{bar}{m} \cdot 58,3 m = 0,960 bar$$

Yderligere bestemmes bidraget til trykfaldet, grundet højdeforskellen ΔB , ved brug af ligning 48:

$$\rightarrow \Delta P_{højdeforskel} = \rho \cdot g \cdot \Delta B = 1000 kg/m^3 \cdot 9,82 m/s^2 \cdot 4 m = 39280 Pa = 0,39 bar$$

Det samlede trykfald, og dermed trykbehov, beregnes ved at summere de to bidrag:

$$\rightarrow \Delta P_{samlet} = (\Delta P_{rør} + \Delta P_{fittings}) + \Delta P_{højdeforskel} = 0,960 bar + 0,39 bar = 1,35 bar$$

Kommentar: Det ses, at det er muligt at udtrykke tryktabet i en virkelig proces ved at benytte beregning for alle dele i en processtreng: lige rør, fittings, ventiler og højdeforskel. Det beregnede tryktab udtrykker det tryk, som en pumpe minimum skal kunne producere for at udføre det nødvendige arbejde. I praksis vil man vælge en pumpe som er lidt større end det minimale behov ved at multiplicere med en sikkerhedsfaktor, som kan være alt fra 1,2 til 1,5 afhængig af behovet. Det ses, at den valgte pumpe, som kan levere 3,15 bar vedvarende, sagtens kan udføre opgaven.

Eksempel 7-15. Kapacitet i en proceslinje

Problem: Beregn det tryk, som pumpen skal kunne levere under pumpning af produkt fra Tank 1 til Tank 2 (se Eksempel 7-14). Det vil sige, bestem trykfaldet i det system, som er mellem Tank 1 og Tank 2. Beregn tillige tømningstiden for Tank 1.

Data: Oplysninger fra Eksempel 7-14 benyttes igen.

Løsning: Det ses, at en del af rørstrengen til Tank 2 har en mindre rørdimension end for den største del af rørstrengen. Derfor er det nødvendigt at beregne et nyt trykfald for strømmingen i det mindre rør.

De samme ligninger (ligning 28 og 31), som er benyttet i eksempel 7-14 benyttes igen, men opskrives nu med diameter og volumetrisk strømningshastighed som ubekendte. Dermed er det enklere at justere beregningerne (hvilket der er behov for i løsningen):

$$\rightarrow \bar{v} = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{3600 \cdot \pi / 4 \cdot D^2} = \frac{\dot{V}}{2827 \cdot D^2} \quad [m/s]$$

$$\rightarrow Re = \frac{\bar{v} \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{\bar{v} \cdot D \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}}{1 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s} = \bar{v} \cdot D \cdot 1000000 = \frac{\dot{V} \cdot D \cdot 1000000}{2827 \cdot D^2} = \frac{\dot{V} \cdot 354}{D}$$

Trykfaldet for pumpning til Tank 3 er beregnet i Eksempel 7-14 til 1,35 bar og det er godtgjort, at denne proces fint kan lade sig gøre med den tilgængelige centrifugalpumpe.

For at beregne trykfaldet for pumpning til Tank 2 gentages beregningen fra Eksempel 7-14 for et 1,5" rør.

Først skal karakteristika for strømmingen i 1,5" røret beregnes. Der fås:

$$\text{➤ } \bar{v} = 5,58 \text{ m/s og } Re = 198648$$

Således fås altså en meget højere strømningshastighed i det mindre rør.

Der er to rørdimensioner i denne strømning og trykfaldet for rør og fittings må beregnes hver for sig for de to rørdimensioner: $\Delta P = \Delta P (2") + \Delta P (1,5")$ [Pa].

Trykfaldet pr. meter rør kendes allerede for 2" røret $\Delta P/L$ (2" rør) og der skal således blot beregnes en ny længde (der er et T-stykke som 90° bøjning og en ventil):

$$\text{➤ } L(2") = L + L_e = 20 \text{ m} + (1 \cdot 60 + 1 \cdot 10) \cdot 0,0486 \text{ m} = 23,4 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \Delta P(2") = 0,01648 \frac{\text{bar}}{\text{m}} \cdot 23,4 \text{ m} = 0,386 \text{ bar}$$

For strømmingen i 1,5" rør bestemmes $\Delta P/L$ [Pa/m] analogt til beregningen i Eksempel 7-14 som vist nedenfor:

$$\text{➤ } f = 0,048 \cdot Re^{-0,20} = 0,048 \cdot 198648^{-0,20} = 0,00418$$

$$\text{➤ } \frac{\Delta P}{L} = \frac{2 \cdot f \cdot \bar{v}^2 \cdot \rho}{D} = \frac{2 \cdot 0,00418 \cdot (5,58 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,0356 \text{ m}} = 7319 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} = 0,07319 \frac{\text{bar}}{\text{m}}$$

Den ækvivalente længde fra fittings er:

$$\text{➤ } L_e = (2 \cdot 35) \cdot 0,0356 \text{ m} = 2,5 \text{ m}$$

Derfor er den samlede længde:

$$\text{➤ } L = (40 + 2,5) \text{ m} = 42,5 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \Delta P(1,5") = 0,07319 \frac{\text{bar}}{\text{m}} \cdot 42,5 \text{ m} = 3,11 \text{ bar}$$

Det samlede trykfald bliver $\Delta P = \Delta P (2") + \Delta P (1,5") = (0,386 + 3,11) \text{ bar} = 3,5 \text{ bar}$. Det ligger over det tryk, som centrifugalpumpen kan levere (3,15 bar), derfor er det nødvendigt at justere på den volumetriske strømningshastighed for at bringe tryktabet ned.

Naturligvis kunne der regnes baglæns med et samlet tryktab på 3,15 bar, men man kan også blot gætte på en ny passende kapacitet. Derfor sættes $\dot{V} = 16 \text{ m}^3/\text{h}$, hvilket giver:

$$\text{➤ } \bar{v} = 4,47 \frac{\text{m}}{\text{s}}, Re = 159132, \text{ og } f = 0,048 \cdot 159132^{-0,20} = 0,00437$$

Og dermed fås:

$$\text{➤ } \frac{\Delta P}{L} = \frac{2 \cdot f \cdot \bar{v}^2 \cdot \rho}{D} = \frac{2 \cdot 0,00437 \cdot (4,47 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,0356 \text{ m}} = 0,0491 \frac{\text{bar}}{\text{m}}$$

$$\text{➤ } P(1,5") = 0,0491 \frac{\text{bar}}{\text{m}} \cdot 42,5 \text{ m} = 2,085 \text{ bar}$$

Det samlede tryktab bliver da:

$$\text{➤ } \Delta P = (0,386 + 2,085) \text{ bar} = 2,471 \text{ bar}$$

Hvilket fint kan lade sig gøre med den pumpe, der er til rådighed også hvis der tages højde for en sikkerhedsfaktor på 1,2, i så fald bliver trykbehovet 2,97 bar.

Det ses fra voluminerne på Tank 2 og Tank 3, at de begge skal tages i brug for at kunne tømme Tank 1. I beregningen vælges det først at fylde Tank 3, da den volumetriske strømningshastighed kan være størst for denne tank. Tiden for fyldning beregnes ved at dividere den volumetriske strømningshastighed op i tankvoluminet.

Tiden for fyldning af Tank 3 på 12 m^3 ($20 \text{ m}^3/\text{h}$) bestemmes af:

$$\text{➤ } \frac{V}{\dot{V}} = \frac{12}{20} = 0,6 \text{ time} = 36 \text{ minutter}$$

Tiden for fyldning af Tank 2 med de resterende 8 m^3 ($16 \text{ m}^3/\text{h}$), der ikke kunne være i Tank 3 bestemmes af:

$$\text{➤ } \frac{V}{\dot{V}} = \frac{8}{16} = 0,2 \text{ time} = 30 \text{ minutter}$$

Den samlede tømningstid bliver derfor:

$$\text{➤ } 36 + 30 = 66 \text{ minutter}$$

Kommentar: Det ses, at selvom det er muligt at beregne tømningstiden uden at bestemme trykfaldet, så er det altid hensigtsmæssigt at validere, om trykfaldet ligger inden for det mulige arbejdstryk, som pumpen kan levere. Hvis pumpen er begrænsningen, som vist i dette tilfælde, så er den eneste løsning at reducere kapaciteten.