Utanpåliggande givare

FÖR MÄTNING AV FLUIDTEMPERATUR I RÖR.

Ibland kan man tyvärr inte mäta temperaturen hos den strömmande fluiden i ett stålrör med hjälp av en insticksgivare. Det finns flera orsaker till att man inte bör använda insticksgivare. Ett skäl kan vara att fluiden i röret är mycket nedsmutsad och man vill undvika att smutsen fastnar på insticksgivaren. Ett annat skäl är att man vill undvika att borra hål i röret.

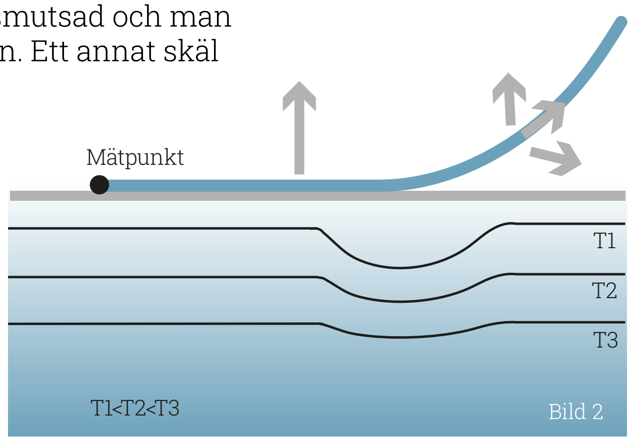

Bild 2

OM MAN INTE KAN ANVÄNDA en insticksgivare kan fluidens temperatur bestämmas med hjälp av en utvändigt monterad anliggningsgivare, *Bild 1*. En beröringsgivare, exempelvis manteltermoelement och Pt100, mäter enbart givarens egen temperatur och absolut ingenting annat. Det innebär i det här fallet att anliggningsgivaren mäter fluidtemperaturen på fel plats. Man måste därför fundera på hur stor avvikelsen blir mellan den temperatur som man mäter och den temperatur som man vill mäta. Hur stor avvikelsen blir påverkas av flera faktorer, som kommer att diskuteras i artikeln.

I *Bild 1* har fluiden en högre temperatur än omgivningen och värmeflödet sker nu från fluiden till omgivningen. På insidan av röret sker värmetransporten genom påtvingad konvektion. I rörväggen sker värmetransporten genom värmeledning och på rörets utsida sker värmetransporten till omgivningen genom strålning och konvektion Lufthastigheten i rörets omgivning är ofta låg, vilket gör att det handlar om naturlig konvektion.

Installation av utanpåliggande givare

Vid givarinstallationen måste man förvissa sig om att kontakten mellan röret och mätspetsen på givaren blir så bra som möjligt. Värmeöverföringen mellan röret och givarspetsen blir mer kontrollerbar om givaren monteras i kontakt med ytan längs en viss sträcka, *Bild 2*. I och med att givarspetsen nu i princip utgör en del av mätobjektet – stålröret - antar den i stort sett samma temperatur som objektet. Där givaren lämnar röret transporteras värme i givaren genom värmeledning. Från givaren överförs sedan värmen till den omgivande luften genom strålning och konvektion, *Bild 2*. Värmeflödet i givaren påverkar rörets temperatur och speciellt i det område där givaren lämnar röret, men det värmeflödet har ytterst lite inverkan på givarspetsens temperatur.

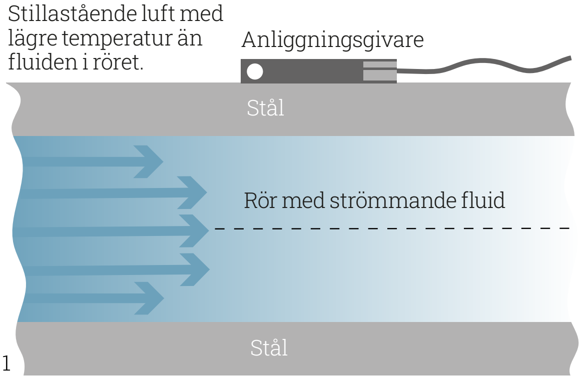

Bild 1

Exempel på mätning av temperatur hos luft och vatten i ett rör. Anliggningsgivare och konstant flöde i röret

Vi betraktar nu som exempel ett långt rakt rostfritt rör med innerdiametern 80 mm och godstjockleken 5 mm. I röret strömmar vatten med temperaturen 70°C och medelhastigheten 2 m/s. Röret finns i en verkstadslokal med temperaturen 15 °C.

Värmekonduktiviteten hos rostfritt stål (18/8) är 15 W/(m K). Den konvektiva värmeövergångskoefficienten på insidan av röret kan beräknas till 9020 W/(m^{2}K) och totala värmeövergångskoefficienten på utsidan av röret uppskattas till 8 W/(m^{2}K). I detta värde inkluderas både egenkonvektion och strålning.

Värmeflödet från det varma vattnet i röret till verkstadslokalen blir med dessa data 124 W/m, rörets innertemperatur 69.95 °C och rörets yttertemperatur 69.80 °C. Med en rätt installerad givare mäter vi den senare temperaturen. Skillnaden ΔT °C mellan den temperatur som man vill mäta, 70 °C, och den man mäter är i detta fall obetydlig; $\Delta T = 0.2$ °C. Man kan också notera att skillnaden mellan rörets inner- och yttertemperatur är mycket liten, 0.15 °C.

Vi betraktar samma rör som tidigare, men i röret strömmar nu luft med temperaturen 70 °C och medelhastigheten 5 m/s. Övriga geometriska och värmetekniska data är samma som tidigare.

Den konvektiva värmeövergångskoefficienten på insidan av röret kan beräknas till 24.1 W/(m^{2}K). Värmeflödet till verkstadslokalen blir med dessa data 90 W/m, rörets innertemperatur 55.1 °C och rörets yttertemperatur 55.0 °C. En rätt installerad givare mäter den senare temperaturen. Skillnaden ΔT °C mellan den temperatur som man vill mäta, 70 °C, och den man mäter är i detta fall betydligt större än i det föregående fallet, ΔT = 15 °C jämfört med ΔT = 0.2 °C. Man kan också notera att även i detta fall är skillnaden mellan rörets inner- och yttertemperatur mycket liten, 0.1 C, vilket beror på att värmemotståndet i stålröret är mycket litet.

I *Bild 3* visas en principiell bild av de båda temperaturfördelningarna. Luft och vatten kan betraktas som representativa ämnen för gaser respektive vätskor. I nästan alla liknande rörströmningsfall med en utanpåliggande givare gäller att mätfelet blir större, när gas strömmar i röret jämfört med när vätska strömmar. Man skulle kunna säga att det är lättare att mäta i vätska än i gas.

Inverkan på mätfelet vid isolering av röret

Om det är möjligt bör man isolera röret. En anledning är att minska värmeförlusten från röret och en annan är att förhindra brännskador. Om man har installerat en anliggningsgivare är det dessutom lämpligt att isolera röret för att minska mätfelet. Tyvärr är det inte i alla sammanhang tillåtet eller praktiskt möjligt att isolera röret.

Röret som vi tidigare har diskuterat isoleras nu med 50 mm mineralull med värmekonduktiviteten 0.040 W/(m K). Vid beräkningen använder vi samma värden på värmeövergångskoefficienterna som tidigare. Värmeförlusten minskar från 124 W/m till 17 W/m, när det strömmar vatten i röret. För luftströmningsfallet minskar värmeförlusten från 90 W/m till 16 W/m. Värmemotståndet bestäms nu i huvudsak av värmemotståndet i isoleringen och värmemotståndet på utsidan av isoleringen.

I båda fallen ökar temperaturen på rörets utsida. Med strömmande vatten i röret ökar temperaturen från 69.80 °C till 69.97 °C och med strömmande luft ökar temperaturen från 55.0 °C till 67.3 °C. Man kan notera att ökningen i vätskefallet är obetydlig medan ökningen i luftfallet är avsevärd. Isoleringen betyder att mätfelet i luftfallet minskar från 15.0 °C till 2.7 °C. För att minska mätfelet bör man därför alltid isolera röret.

Nedsmutsning av rör

Om nedsmutsningen sker på insidan av röret ökar mätfelet och om den sker på utsidan minskar mätfelet. Smutsen kan betraktas som en typ av isolering. Vad som händer om röret blir nedsmutsat på både insidan och utsidan är det svårt att uttala sig om generellt. För det fallet krävs en noggrannare analys.

Lämplig placering av anliggningsgivare vid rörkrökar och areaändringar

Om man tänker installera en givare i närheten av en rörkrök eller en areaändring hos röret finns det anledning att fundera en extra gång. *Se Bild 4.* Nedströms rörets diameterökning uppstår ett så kallat avlösningsområde (”wake”), som karakteriseras av låg hastighet och återströmning. Den låga hastigheten gör att fluiden i detta område anpassar sig långsamt till temperaturen i huvudströmningen. Om man skulle installera en anliggningsgivare vid detta område kommer givaren att reagera långsamt på temperaturändringar hos fluiden.

Om man eftersträvar en så kort svarstid som möjligt bör man installera givaren i sektion A, där fluidens hastighet är som högst. Hög fluidhastighet innebär ett högre värmeflöde till väggen vid temperaturändringar och därmed kort svarstid. Strömningshastigheten i sektion B är lägre än den i sektion A. En givarinstallation i sektion B ger därför en något längre svarstid än en installation i sektion A.

I de fall fluiden är smutsig bör man undvika en givarinstallation vid avlösningsområdet. Smutsen samlas i avlösningsområdet och den ökar både mätfelet och svarstiden. Nedströms en rörkrök uppstår ofta ett eller flera avlösningsområden. Anliggningsgivare bör därför installeras uppströms rörkröken om det är möjligt.

Svarstiden vid ett oisolerat rör utan nedsmutsning – uppskattning av svarstiden

Bestämning av svarstiden vid anliggningsgivare är nästan alltid mer komplicerad än bestämning av svarstiden vid insticksgivare. Förutom strömningens egenskaper och anliggningsgivarens konstruktion och termiska egenskaper påverkas svarstiden i detta fall även av rörets termiska egenskaper och dimensioner.

Möjligheten att göra en någorlunda enkel uppskattning av svarstiden beror i det aktuella fallet på vilken fluid som strömmar i röret. Vid beräkning av svarstiden måste man i detta fall inkludera röret, vars massa och dimension är betydligt större än givarens. Normalt betyder det att det är rörets egenskaper som bestämmer svarstiden för anliggningsgivaren.

Vi betraktar nu samma oisolerade rör som tidigare och kommenterar några möjligheter att uppskatta svarstiden. Om man skall tillämpa den så kallade ”klumpmetoden” för att beräkna svarstiden krävs att följande villkor är uppfyllt för ”klumpen”, som i detta fall är rörväggen.

$$(\alpha\, s)/\lambda < 0.1$$

där, α är värmeövergångskoefficienten på rörets insida i $W/(m^2K)$, s en karakteristisk längd som i detta fall är rörtjockleken och λ är rörmaterialets värmekonduktivitet i W/(m K). Den dimensionslösa parametern $(\alpha\, s)/\lambda$ kallas Biot-talet, Bi. Fysikaliskt innebär villkoret Bi < 0.1 att temperaturdifferensen mellan fluiden och

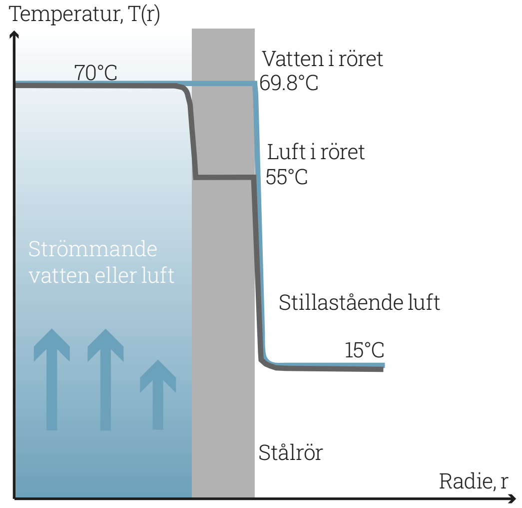

Bild 3

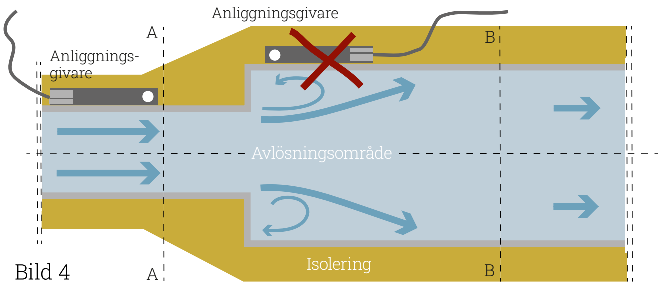

Bild 4

röret skall vara mycket större än temperaturdifferensen mellan rörets in- och utsida.

För det tidigare exempel med luftströmning är värmeövergångskoefficienten på rörets insida 24.1 W/(m²K), rörtjocklek 0.005 m och rörmaterialets värmekonduktivitet 15 W/(m K). Man finner Bi = 0.008. Detta betyder att villkoret är väl uppfyllt och vi kan använda ”klumpmetoden”.

”Klumpen”, det vill säga röret med anliggningsgivaren, antas ha temperaturen T(t) °C, där t är tiden i sekunder. Temperaturen hos rörväggen beror nu endast av tiden och inte av läget i rörväggen. Röret har från början temperaturen 56.3°C. Lufttemperaturen inuti röret ändras nu i form av ett steg från begynnelsetemperaturen 70 °C till temperaturen 75 °C. Efter insvängningstiden kommer rörväggen att få temperaturen 60.0 °C. För bestämning av rörtemperaturen har jag använt samma beräkningsgång och samma värmeövergångskoefficienter som tidigare, men jag har försummat det minimala värmemotståndet i rörväggen.

För rörväggens temperatur, T = T(t) °C, gäller nu följande differentialekvation

$$(\rho Vc)\,(dT/dt) = (\alpha_F A)(T_F - T) - \alpha_y A_y (T - T_y)$$

där, ρ är rörväggens densitet i kg/m³, $V = \pi DsL$ rörväggens volym i m³, D rörets innerdiameter i m, s rörväggens tjocklek i m, L rörets längd i m, c rörväggens specifika värmekapacitet i (Ws)/(kg K), α_F värmeövergångskoefficienten på rörets insida i W/(m²K), $A = \pi DL$ rörväggens innerarea i m², T_F fluidens temperatur °C. α_y värmeövergångskoefficienten på rörets utsida i W/(m²K), A_y rörväggens ytterarea i m² och T_y omgivningens temperatur i °C.

Vänsterledet i differentialekvationen representerar väggens energiändring med tiden. Första termen i högerledet är värmetillförsel till rörväggen från fluiden och andra termen i högerledet är värmeavgivningen från rörväggen till omgivningen.

Vi betraktar nu ett rör med längden L = 1 m. Skillnaden mellan rörets ytterarea och innerarea är mycket liten i detta fall och vi antar därför $A_y = A$. Differentialekvationen kan nu skrivas

$$dT/dt) + (1/\rho sc)\,(\alpha_F + \alpha_y)\,T = (1/\rho sc)\,(\alpha_F T_F + \alpha_y T_y)$$

För väggens begynnelsetemperatur T = T(0) gäller med fluidtemperaturen $T_F = T_{F0}$ följande samband som innebär att värmeflödet till väggen är lika med värmeflödet från väggen

$$(\alpha_F A)(T_{F0} - T(0)) = (\alpha_y A)(T(0) - T_y)$$
$$T(0) = (\alpha_F T_{F0} + \alpha_y T_y)/\,(\alpha_F + \alpha_y)$$

Vi antar nu att fluidens temperatur ändras stegvis från T_{F0} °C till T_{F1} °C. Differentialekvationen med tillhörande begynnelsetemperatur kan nu skrivas

$$dT/dt) + (1/\rho sc)\,(\alpha_F + \alpha_y)\,T = (1/\rho sc)\,(\alpha_F T_{F1} + \alpha_y T_y)$$
$$T(0) = (\alpha_F T_{F0} + \alpha_y T_y)/\,(\alpha_F + \alpha_y)$$

Lösningen av differentialekvationen blir

$$T(t) = -((\alpha_F (T_{F1} - T_{F0})/(\alpha_F + \alpha_y))\,e^{-mt} + (\alpha_F T_{F1} + \alpha_y T_y)/(\alpha_F + \alpha_y)$$
$$m = (1/\rho sc)\,(\alpha_F + \alpha_y)$$

Begynnelsetemperaturen T = T(0) är för det aktuella exemplet när vi försummar väggens värmemotstånd

$$T(0) = (\alpha_F T_{F0} + \alpha_y T_y)/\,(\alpha_F + \alpha_y) = 56.3\ °C$$

Efter insvängningstiden antar väggen temperaturen $T_{mät}$ °C

$$T_{mät} = (\alpha_F T_{F1} + \alpha_y T_y)/(\alpha_F + \alpha_y) = 60.0\ °C$$

Halva temperaturökningen 3.7/2 °C uppnås efter svarstiden $\tau_{0.5}$ = 404 sekunder = 6.7 minuter. Svarstiden är alltså ganska lång – nästan 7 minuter – och huvudanledningen är den förhållandevis låga värmeövergångskoefficienten inuti röret.

För det tidigare exempel med vattenströmning är värmeövergångskoefficienten på rörets insida 9020 W/(m²K), rörtjocklek 0.005 m och rörmaterialets värmekonduktivitet 15 W/(m K). Man finner Bi = 3.0. Detta betyder att villkoret för ”klumpmetoden” inte är uppfyllt och vi kan därför inte använda den metoden. Temperaturdifferensen mellan rörets in- och utsida är i detta fall inte försumbar jämfört med temperaturdifferensen mellan fluiden och rörväggen.

En möjlighet att uppskatta svarstiden i detta fall är att vi betraktar rörväggen som en plan vägg och dessutom bortser vi från värmeflödet till omgivningen. Det senare är i detta fall betydligt mindre än värmeflödet från fluiden. Vi kan då utnyttja en analytisk lösning till detta problem och finner då att svarstiden $\tau_{0.5}$ är drygt 3 sekunder (3.4 s).

För luftströmning i röret handlar svarstiden i detta exempel om minuter och för vattenströmning i röret handlar det om sekunder.

Anliggningsgivare för mätning av fluidtemperatur i ett rör – en sammanfattning.

Några fördelar med anliggningsgivare
- Man behöver inte borra hål i röret för givaren
- Givaren ökar inte tryckfallet i röret, vilket är fallet med en insticksgivare
- Vid smutsiga fluider stör inte anliggningsgivaren strömningen

Några nackdelar med anliggningsgivare
- Man mäter temperaturen på fel plats vilket kan öka mätfelet
- Svarstiden ökar
- Dålig anliggning mellan röret och givaren ökar både mätfel och svarstid.

Dan Loyd, Professor emeritus,
Linköpings universitet.