

OSNOVI MJERENJA

**Petar Vukoslavčević
Esad Tombarević**

*„Ne može se uspješno upravljati
onim što se ne može izmjeriti“*

Podgorica, 2009 g.

Mašinski fakultet

Sadržaj

- Mjerni sistemi
- Mjerenje temperature
- Mjerenje pritiska
- Mjerenje protoka i brzine
- Mjerenje vlažnosti

1. MJERNI SISTEMI-INSTRUMENTI

Mjerni sistemi odnosno instrumenti su uređjaji čiji je zadatak da obezbijede tačnu numeričku predstavu mjerene veličine.

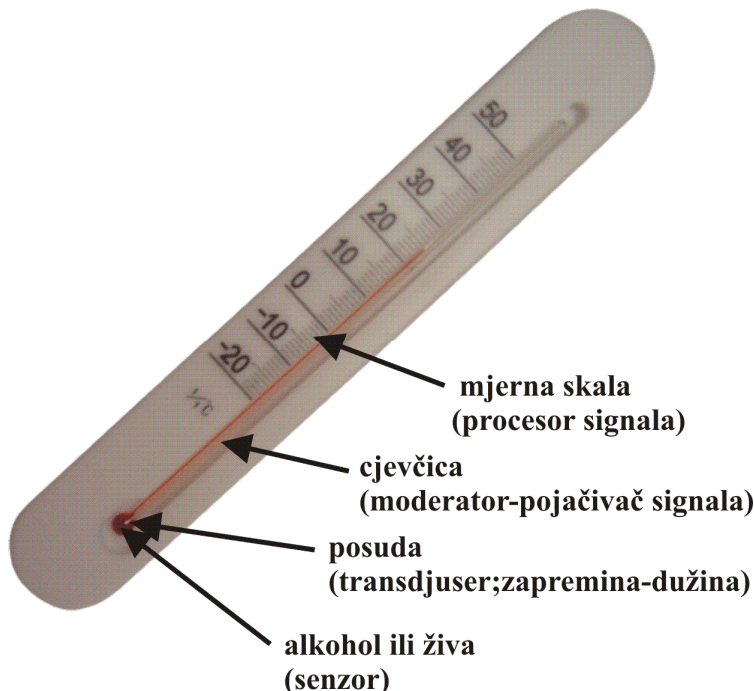
Komponente mjernih sistema

Osnovne komponente mjernih sistema su: senzor, transdjuser, moderator i procesor

- Senzor → element osjetljiv na promjenu mjerene veličine: fluid koji se širi pri zagrijavanju, otpornik koji mijenja otpor sa promjenom temperature, membrana koja se deformiše pod pritiskom itd.
- Transdjuser → uređjaj koji transformiše signal iz jednog u drugi oblik: promjenu zapremine u promjenu dužine, promjenu otpora u promjenu napona, promjenu deformacije u promjenu otpora itd.
- Moderator → transformiše signal u željeni oblik ne mijenjajući njegovu fizičku suštinu: pojačivači signala, filteri, linearizeri i sl.
- Procesor signala → uređjaj koji omogućuje očitavanje i upis signala: mjerna skala, analogno-digitalni konvertor (ATD), kompjuter itd.

Mjerni sistem može biti dizajniran tako da svaka od ovih komponenti predstavlja poseban element sistema ili da više njih budu kombinovane u posebnu cjelinu. Tako npr. veoma često se senzor i transdjuser spajaju u jednu cjelinu i prodaju kao senzor ili transdjuser. Isto tako se mogu spojiti moderator i procesor signala i naći pod zajedničkim imenom kao procesor. Postoje i sistemi u kojima su spojeni transdjuser, moderator i procesor signala. Ovakav spoj, poznat kao procesor ili "Data logger" (dejta loger), može opslužiti senzore različite namjene i opsega.

Na sl.1.1 je prikazan termometar, jedan od najjednostavnijih mjernih sistema, na kome se jasno razaznaju sve karakteristične komponente.



Sl.1.1 Osnovne komponente mjernog sistema

Na sl.1.2 je prikazana multifunkcionalni mjerni sistem firme “Testo”, koji je izuzetno pogodan za mjerenje različitih parametara sistema za klimatizaciju, grijanje i provjetravanje. Transdjuser, moderator i procesor signala su spojeni u jednu cjelinu koja može opslužiti senzore-sonde različite namjene i opsega. Ova cjelina je definisana kao multifunkcionalni procesor i zajedno sa odgovarajućim sensorima predstavlja mjerni sistem. Dizajnirana je tako da omogućava učitavanje, memorisanje i štampanje trenutnih, maksimalnih, minimalni i srednjih vrijednosti mjerenih parametara, kao i određivanje (proračun) fizičkih veličina koje su funkcije ne samo mjerenih parametara već i nekih drugih fizičkih karakteristika koje se mogu unijeti u mjerni sistem. Neke varijante imaju mogućnost direktnog konektovanja na PC što omogućava dodatno procesuiranje i analizu signala.



multifunkcionalni procesor

senzori - sonde

Sl.1.2 Multifunkcionalni mjerni sistem firme “testo“ sa odgovarajućim sensorima-sondama

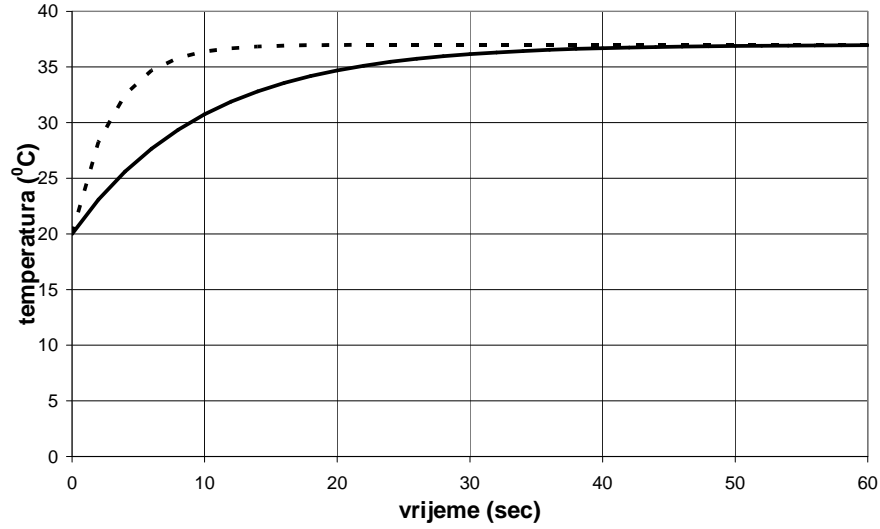
Osnovne karakteristike mjernih sistema

Osnovne karakteristike mjernih sistema su: opseg, rezolucija, greška mjerenja (tačnost, preciznost), maksimalno dozvoljeno opterećenje, osjetljivost, linearnost i vremenski odziv. Pored navedenih, značajan je i niz drugih karakteristika, kao što su: interakcija sa

mjerenom veličinom, način napajanja, uslovi primjene, i sl. Izbor optimalnog mjernog sistema se vrši na osnovu navedenih osnovnih karakteristika sistema.

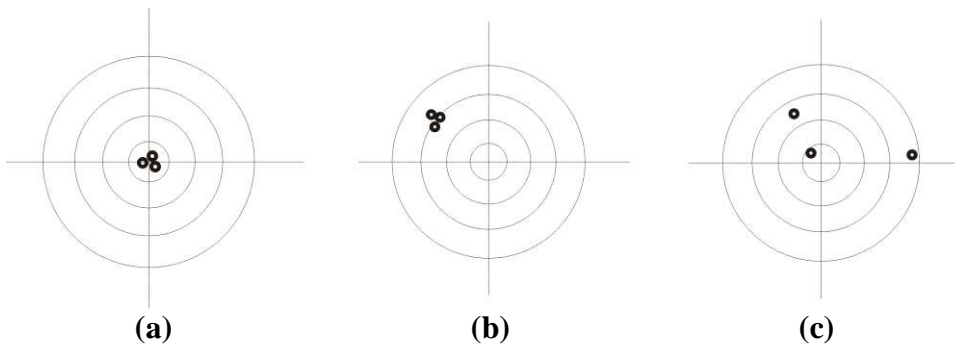
- **Opseg** → predstavlja mjernu oblast instrumenta od minimalne do maksimalne vrijednosti mjerene veličine.
- **Rezolucija** → najmanja vrijednost mjerene veličine koja se može pouzdano pročitati ili registrovati na datom instrumentu.
- **Greška mjerenja** → je razlika izmjerene i tačne vrijednosti. Postoje dvije karakteristične greške mjerenja; sistemska i slučajna greška. Ako mjerni sistem pri više ponovljenih mjerenja pokazuje uvijek istu grešku onda je takva greška sistemska i može se lako otkloniti putem kalibracije. Ako se pri svakom ponovljenom mjerenju pokazuju različite greške onda se takve greške smatraju slučajnim. Odnos greške mjerenja i tačne vrijednosti mjerene veličine predstavljaju relativnu grešku mjerenja. Ova greška se najčešće daje u procentualnom iznosu mjernog opsega instrumenta.
- **Tačnost, preciznost** → mjerni sistem se smatra tačnim ako nema slučajnu ili sistemska grešku odnosno ako su ove greške u prihvatljivim okvirima. Mjerni sistemi sa sistemskom greškom se smatraju preciznim mjernim sistemima.
- **Maksimalno dozvoljeno opterećenje** → predstavlja maksimalnu dozvoljenu vrijednost mjerene veličine kojom se može izložiti mjerni sistem. Obično je za red veličine veća od maksimalne vrijednosti opsega mjernog sistema.
- **Osjetljivost** → predstavlja odnos promjene mjerene veličine i promjene pokazivanja instrumenta.
- **Statički odziv** → predstavlja vezu mjerene veličine i pokazivanja instrumenta kada se promjena mjerene veličine odvija u statičkim uslovima (poslije svake promjene mjerene veličine sačeka se dovoljno dugo dok se pokazivanje instrumenta ustali). Ako je ova veza linearna, senzor ima tzv. linearnu karakteristiku. Osjetljivost ovakvih senzora je konstantna i ne zavisi od inteziteta mjerene veličine. U suprotnom, njegova karakteristika je nelinearna i osjetljivost senzora je funkcija mjerene veličine.
- **Dinamički odziv** → definiše reakciju instrumenta na dinamičku promjenu mjerene veličine. Karakteriše ga *vrijeme odziva* i *kritična frekvenca* sistema. Kada se intezitet signala mijenja od jednog do drugog stacionarnog stanja, vrijeme za koje pokazivanje instrumenta dostigne 90% mjerene veličine predstavlja vrijeme odziva sistema. Ono zavisi od vremenske konstante sistema koja je prvenstveno funkcija oblika i dimenzija senzora. Pri mjerenju periodičnih i uopšte nestacionarnih signala odnos magnituda i faznog pomjeranja mjenog signala i pokazivanja instrumenta je funkcija vremenske konstante sistema i frekvence signala. Za svaki sistem, sa poznatom vremenskom konstantom, postoji tzv. kritična frekvenca ulaznog signala pri kojoj je ovaj odnos u prihvatljivim granicama.

Na sl.1.3 je prikazan odziv dva termometra sa različitim vremenima odziva, čiji je odnos 1:3. Očigledno je da termometar sa manjim vremenskim odzivom dostiže mjernu temperaturu tri puta brže od drugog termometra.



Sl.1.3 Odzivi termometara sa različitim vremenskim odzivima

Na sl. 1.4 su prikazani rezultati mjerenja sa tačnim (zanemarljiva greška mjerenja), preciznim (sistematska greška) i mjernim sistemom sa velikom greškom mjerenja.

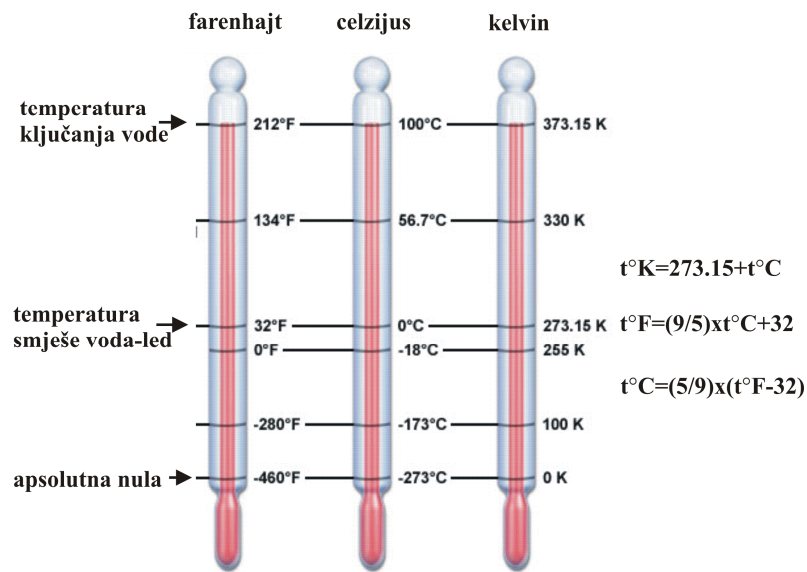


Sl.1.4 Sistem sa zanemarljivom (a), sistematskom (b) i relativno velikom greškom mjerenja (c).

Mjerni opseg i apsolutna greška mjerenja instrumenta su dvije suprotstavljene karakteristike. Instrumenti sa malom apsolutnom greškom i visokom rezolucijom imaju limitirane mjerne opsege. Tako npr. ako želimo da mjerimo pritisak sa greškom u granicama od ± 0.5 Pa, mjerni sistem će imati opseg od oko 200 Pa itd. Postoje i mjerni sistemi sa mogućnošću izbora različitih vrijednosti opsega i tačnosti.

2.MJERENJE TEMPERATURE

Temperatura je, po definiciji, proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji velikog broja molekula. Očigledno je da njeno direktno mjerenje nije moguće. Imajući u vidu da mnoge druge fizičke karakteristike materije, kao npr. zapremina, zavise od temperature, moguće je mjerenjem promjene zapremine steći predstavu o promjeni temperature. Zavisno od usvojenih repernih tačaka i rezolucije imamo različite temperaturske skale. Najpoznatije su Celzijusova, Kelvinova i Farenhajtova. Celzijus je kao repere tačke uzeo temperature zamrzavanja i ključanja vode na atmosferskom pritisku i taj opseg podijelio na 100 djelova. Farenhajt je uradio slično ali je nulu svoje skale odredio koristeći smještu vode i amonijumhlorida. Kelvinova nula je apsolutna nula kada prestaje kretanje molekula. Na sl.2.1 su date ove tri skale sa odgovarajućim izrazima za preračunavanje temperatura.



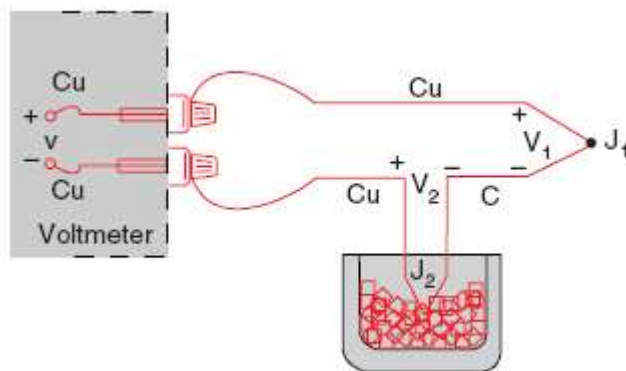
Sl.2.1 Temperaturske skale

Osnovni mjerni sistemi ili instrumenti za mjerenje temperature su: klasični termometri, otporni termometri, termistori, termoparovi, i pirometri.

- **Klasični termometri.** Primjer klasičnog termometra je prikazan na sl.2.1. Senzori ovih termometara su različite vrste fluida, najčešće živa ili alkohol, čija se zapremina povećava sa porastom temperature. Tanka cjevčica kojom se nastavlja posuda sa živom omogućuje očitavanje malih promjena zapremine odnosno temperature. Odlikuje ih linearna karakteristika, konstantna osjetljivost, relativno velika vremenska konstanta i ograničen mjerni opseg.
- **Otporni termometri.** Poznati su i kao RTD-„Resistance temperature detectors“. Princip rada otpornih termometara se zasniva na promjeni (porastu) otpora različitih materijala sa porastom temperature. Ako se kroz ovakav otpornik propusti struja konstantnog inteziteta doći do promjene napona na krajevima otpornika sa porastom temperature. Ako se priključi na izvor konstantnog napona, doći će do promjene inteziteta struje koja teče kroz otpornik. Intezitet promjene

struje odnosno napona zavisi od promjene temperature. Promjena otpora je linerana funkcija promjene temperature u relativno širokom temperaturskom opsegu. Kao senzori se koriste tanke metalne žice napravljena najčešće od platine ili njenih legura. Zavisno od debljine žice, može se postići relativno visok dinamički odziv senzora (malo vrijeme odziva) sa kritičnom frekvencom do nekoliko stotina Hz. Mjerni opseg ovih termometara se uglavnom kreće u granicama od -200 do 600°C .

- **Termistori.** Termistori rade na istom principu kao i otporni termometri. Za razliku od otpornih termometara senzori termistora se prave i od materijala čiji otpor može da raste, PTC tip (positive temperature coefficient), ili da pada sa porastom temperature, NTC tip (negative temperature coefficient). Senzori se prave od različitih smješa oksida metala ili raznih polimera. Mjerni opseg im je manji od mjernog opsega otpornih termometara i kreće se najčešće u granicama od -90°C do 130°C , mada se mogu koristiti i za šire opsege temperatura, naročito za mjerenje veoma niskih temperatura. Najčešće se primjenjuju kao kontrolni elementi u različitim instalacijama. Karakteriše ih visoka osjetljivost, za red veličine veća od otpornih termometara, nelinearna karakteristika i visok dinamički odziv, zavisno od dimenzija termistora (od nekoliko mikrona do više centimetra).
- **Termoparovi.** Dvije žice napravljene od različitih metala spojene na oba kraja predstavljaju termopar. Kada su spojevi na različitim temperaturama doći će do razlike napona na spojevima i toka struje konstantnog inteziteta kroz ovako zatvoreni strujni krug. Ako je temperatura jednog spoja poznata, npr. 0°C (smješa vode i leda) napon će biti funkcija temperature drugog spoja. Na sl.2.2 je prikazan termopar od bakra (Cu) i konstantana (C), sa spojem J_2 uronjenim u smješu vode i leda čija je temperatura 0°C .



Sl.2.2 Termopar sa hladnim spojem

Napon voltmetra će zavistiti od razlike temperatura ovih spojeva odnosno temperature spoja J_1 . Generisani napon je malog inteziteta, tako da ovi sistemi moraju imati pojačivače. Hladni spoj, koji se može simulirati elektronskim putem, je zajedno sa pojačivačem, i procesorom signala smješten u jednu cjelinu. U istom prostoru se mogu smjestiti transdjuseri i pojačivači različitih signala i formirati mjerni sistem kao u slučaju firme "Testo", prikazan na sl.1.2.

Opseg termopara zavisi od vrste materijala i mogu se kombinovati od različitih metala. Najpoznatije kombinacije su date u tabeli br.1.

Tip	Materijal	Opseg
K	Hromel (leg. nikla i hroma) – alumel (leg. Nikla, aluminijuma i mangana)	(-40→1200) ⁰ C
T	Bakar - konstantan	(-40→350) ⁰ C
J	Gvoždje - konstantan	(-40→750) ⁰ C

Tab.1 Najčešće kombinacije termoparova

Termoparovi se izvode od materijala u vidu žice ili tanke trake. Spojevi žica se izvode u vidu kuglica i pogodni su za mjerenje temperature fluida koji u potpunosti opstrujavaju kuglicu. Spojevi tankih traka se koriste za mjerenje površina predmeta različitih oblika i materijala i poznati su kao kontaktni termoparovi. Dobar kontakt površine čija se temperatura mjeri i površine spoja termopara omogućuje izjednačavanje njihovih temperatura, što nije moguće ukoliko je spoj u vidu kuglice. Odziv termopara zavisi od dimenzija spoja. Relativno je mali i može dostići vrijednost do 10Hz za izuzetno male spojeve.

- **Pirometri - Infracrveni termometri.** Svako tijelo zagrijano na neku temperaturu T (⁰K) zrači energiju u vidu elektromagnetnih talasa. Intezitet ove energije je definisan Stefan-Boltzmanovim zakonom u sledećem obliku

$$e[W/m^2] = \epsilon\sigma T^4,$$

gdje je:

$$\begin{aligned} \sigma &= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 && \text{- Stefan-Boltzmanova konstanta,} \\ 0 < \epsilon < 1 && \text{- koeficijent emisije površine,} \\ T [^\circ K] && \text{- apsolutna temperatura površine.} \end{aligned}$$

Elektromagnetni talasi koje zrači površina se mogu preko optičkog sistema usmjeriti na neki detektor koji će, uz pomoć odgovarajućeg transdjusera, konvertovati absorbovanu energiju u neki električni signal (napon ili struju). Absorbovana energija je proporcionalna emitovanoj energiji površine. Ukoliko je poznat koeficijent emisije površine, ϵ , može se odrediti temperatura površine, T , koja emituje energiju. Na tom principu rade pirometri ili infracrveni termometri. Najveći dio energije koju emituju zagrijana tijela pripada infracrvenom području (crvena svjetlost), odakle i potiče naziv ovih instrumenata.

Pored energije koju zrači, svaka površine reflektuje dio energije koju dobije od okoline. Da bi odredili energiju zračenja, i na taj način tačno odredili temperaturu, treba oduzeti reflektovanu od ukupno emitovane energije. Reflektovana energija prvenstveno zavisi od temperature okolnih tijela koje “vidi” površina čija se temperatura mjeri. U sobnim uslovima to je sobna temperatura koja iznosi oko 20⁰C. Može se izmjeriti i unijeti u instrument ili je unaprijed definisana kao karakteristika instrumenta.

Na sl.2.3 je prikazan infracrveni termometar firme “Testo“. Termometar posjeduje mini laser, čiji zrak služi za označavanje površine na kojoj se mjeri

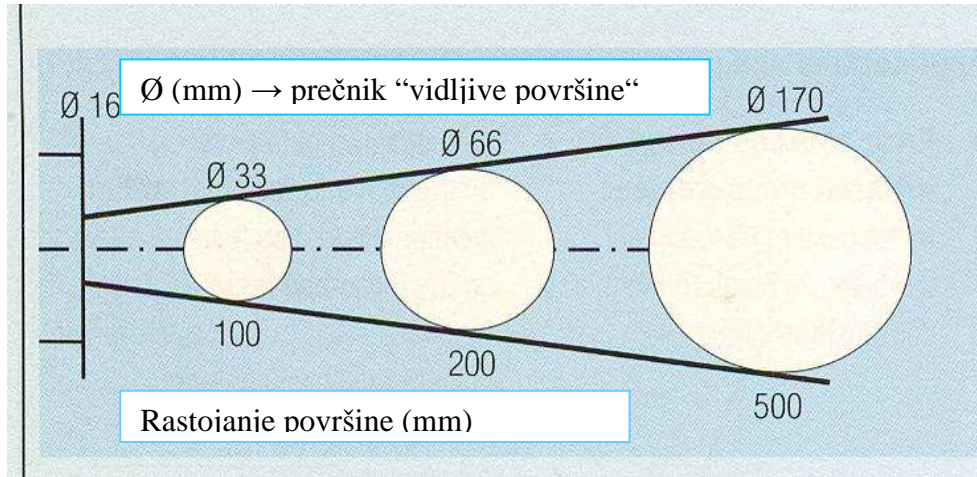
temperatura. Ovaj mjerni sistem ima i mogućnost priključka kontaktnog termopara koji služi za uporedna i kontrolna mjerenja.



Sl.2.3 Infracrveni termometar sa kontaktnim termoparom

Koeficijent emisije površine, ε , koji zavisi od vrste materijala i stanja obradjenosti površine, je parametar koji se mora unijeti u mjerni sistem. Njegova vrijednost se može naći u različitim literaturnim izvorima. Postoji i mogućnost lijepljenja tanke trake poznatog koeficijenta emisije na površinu čija se temperatura mjeri. Ako je traka dovoljno tanka i dobro provodi toplotu, njena temperatura će biti bliska temperaturi površine na koju je zalijepljena. Instrument mjeri srednju vrijednost temperature površine koju "vidi" njegov optički sistem. Treba imati u vidu da veličina ove površine zavisi od rastojanja površine i instrumenta i da uglavnom nije jednaka površini koju osvjetljava laserski zrak, sl.2.4.

Infracrveni termometri omogućuju beskontaktno mjerenje i imaju malu vremensku konstantu - visok dinamički odziv. Na grešku mjerenja mogu znatno uticati sledeći parametri: netačna vrijednost koeficijenta emisije površine, čestice prašine pare ili vlage u prostoru između površine i instrumenta, nečista sočiva instrumenta, isuviše veliko rastojanje od mjerne površine, nečista površina, netačna temperatura okolnih objekata, nagla promjena temperature samog instrumenta itd.



Sl.2.4 “Vidljiva“ površina u funkciji rastojanja od ifracrvenog termometra

- **Infracrvena (termovizijska) kamera.** Princip funkcionisanja infracrvene kamere je identičan principu rada pirometra. Za razliku od pirometra vidno polje kamere je izdijeljeno na niz segmenata. Kamera mjeri temperaturu svakog segmenta posebno i, pomoću specijalnog elektroskog sistema, svakoj temperaturi dodjeljuje odgovarajuću, unaprijed izabranu, boju. Na taj način se formira temperaturska slika posmatranog objekta. Ova slika može biti u crnobijeloj ili kolor tehnici. Njene boje nemaju nikakvu direktnu vezu sa stvarnim bojama tijela.



Sl.2.5 Snimak ulaznih vrata termovizijskom kamerom

Na sl.2.5 je prikazan snimak ulaznih vrata sa termovizijskom kamerom. Na desnoj strani slike je prikazan etalon koji povezuje boju i temperaturu. Tamna polja koja predstavljaju nižu temperaturu ukazuju da vrata nijesu dobro izolovana i da je prisutna infiltracija spoljašnjeg (hladnog) vazduha kroz šupljine izmedju vrata i okvira. Osnovni parametri koji se moraju unijeti u kameru su, kao i kod pirometra, koeficijent emisije površine, ε , i temperatura, T_0 , okolnih objekata koje "vidi" površina. Osnovne karakteristike svake kamere su prostorna rezolucija, određena brojem segmenata (piksela) na koje je podijeljena površina koju "vidi" kamera i temperaturska rezolucija.



Sl.2.6. Spoljašnji snimak stambenog objekta

Na sl.2.6 je prikazan spoljašnji snimak stambenog objekta. Može se uzeti da je temperatura T_0 jednaka temperaturi spoljašnjeg vazduha u slučaju oblačnog vremena. Kada je vrijeme vedro, objekat dobije najveći dio spoljašnje energije iz gornjih slojeva atmosfere čija je temperatura $T_0 \approx -15^{\circ}C$.

3. MJERENJE PRITISKA

Pritisak fluida na kontaktene površine je rezultat kretanja molekula fluida. Zavisí od njihove mase, brzine i broja. Intezitet pritiska će biti različit za fluid koji kao cjelina miruje, struji u pravci ili duž neke površine itd. Imajući to u vidu, razlikujemo sledeće vrste pritiska:

- **Statički pritisak**, p_s , → pritisak u fluidu koji kao cjelina miruje.
- **Totalni ili zaustavni pritisak**, p_t , → pritisak fluida na neku površinu postavljenu normalno na pravac strujanja.
- **Dinamički pritisak**, p_d , → jednak razlici totalnog i statičkog pritiska. Dinamički pritisak je proporcionalan proizvodu gustine ρ_f i kvadrata brzine strujanja, w_f , fluida: $p_d = \rho w_f^2 / 2$.
- **Barometarski pritisak**, p_b , → statički pritisak okolnog atmosferskog fluida.
- **Nadpritisak ili manometarski pritisak**, p_m , → razlika statičkog i barometarskog pritiska.
- **Podpritisak ili vakum**, p_v , → razlika barometarskog i statičkog pritiska u slučaju kada je statički pritisak manji od barometarskog.

Osnovna jedinica za mjerenje pritiska je pascal; $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$. U upotrebi je i niz drugih jedinica koje se koriste u različitim sistemima mjera, kao npr. bar, atmosfera, torr itd. U sledećoj tabeli je dat pregled i odnos ovih jedinica.

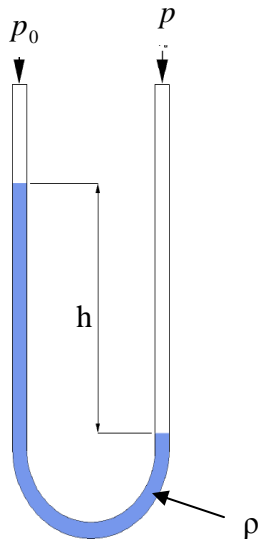
	pascal (Pa)	bar (bar)	tehnička atmosfera (at)	mm živinog stuba (torr)	funta po kvadr. inču (psi)
1Pa	N/m^2	10^{-5}	1.0197×10^{-5}	7.5006×10^{-3}	145.04×10^{-6}
1 bar	10^5	10^5 N/m^2	1.0197	0.98692	14.5037744
1 at	0.980665×10^5	0.980665	1 kp/cm^2	735.56	14.223
1torr	133.322	1.3332×10^{-3}	1.3595×10^{-3}	1 mmHg	19.337×10^{-3}
1psi	6.894×10^3	68.948×10^{-3}	70.307×10^{-3}	51.715	1 lb/in^2

Primjer: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ bar} = 10.197 \times 10^{-6} \text{ at} = 7.5006 \times 10^{-3} \text{ torr} = 145.04 \times 10^{-6} \text{ psi}$

Tab.1 jedinice za mjerenje pritiska

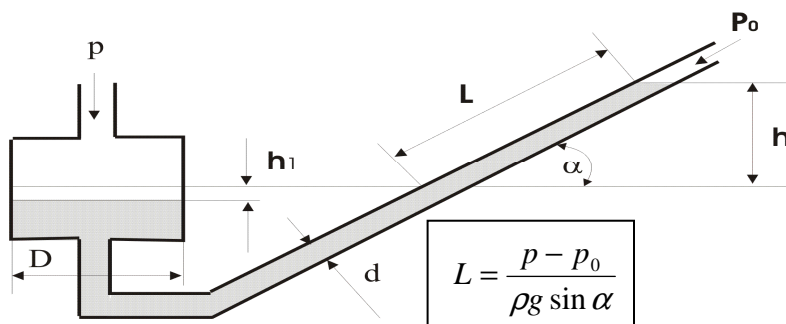
Za mjerenje pritiska se koriste različiti instrumenti zavisno od mjernog opsega, osjetljivosti, tačnosti, dinamičkog odziva, vrste fluida i sl. Poznati su kao manometri ukoliko mjere nadpritisak, vakumetri za mjerenje podpritiska, diferencijalni manometri kada mjere razliku pritisaka i barometri za mjerenje atmosferskog pritiska. Osnovne karakteristike (opseg, tačnost, osjetljivost itd.) mogu varirati za nekoliko redova veličine od jednog do drugog instrumenta, koji se mogu svrstati u tri osnovne grupe: hidrostatički, mehanički i elektronski.

- **Hidrostatički diferencijalni manometri / vakumetri.** Ovi instrumenti se mogu koristiti za mjerenje razlike pritisaka u tečnostima i gasovima. Karakteriše ih jednostavna konstrukcija, linearni odziv, tačnost i preciznost. Međutim, imaju relativno visoku vremensku konstantu odnosno loš dinamički odziv. Zasnivaju se na poznatom zakonu hidrostatičke po kome je razlika pritiska u dva nivoa fluida u stanju mirovanja jednaka proizvodu gustine fluida ρ , ubrzanja zemljine teže g i visinske razlika nivoa h ; $\Delta p = \rho g h$. Ako se fluid smjesti u tzv. U → cijev, sl.3.1, onda će razlika pritisaka na krajevima cijevi biti; $p - p_0 = \rho g h$.



Sl.3.1 Klasična U cijev → $p - p_0 = \rho g h$

Zavisno od mjernog opsega, U cijevi se pune različitim fluidima. Najčešće se koriste; voda, alkohol i živa. Ako se jedan krak cijevi nagne pod uglom α , dobija se manometar sa nagnutom cijevi, sl.3.2. Rezolucija ovog manometra, $\Delta L / \Delta p$, zavisi od ugla α .



Sl.3.2 Manometar sa nagnutom U-cijevi

Razlika pritisaka će biti proporcionalna ukupnoj visinskoj razlici; $p - p_0 = \rho g(h + h_1)$. Imajući u vidu da je $h = L \sin \alpha$ i $h_1 D^2 = h d^2$, slijedi da je, za $D \gg d$ pokazivanje manometra; $L = (p - p_0) / \rho g \sin \alpha$.

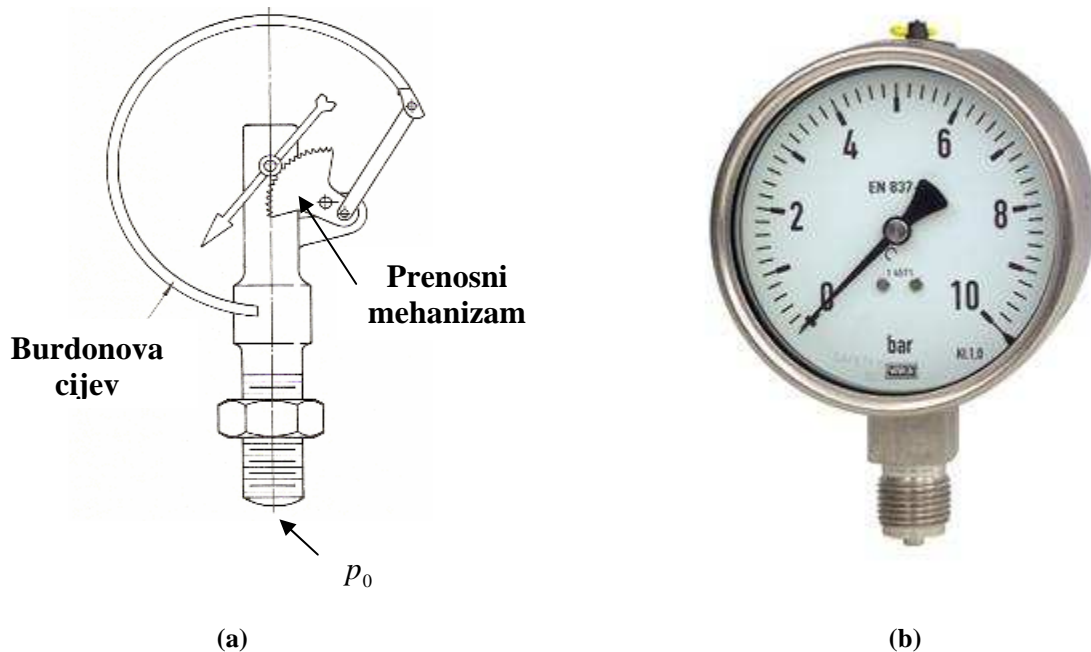


Izborom malog ugla nagiba i korišćenjem optičkih instrumenata za očitavanje mjerne skale, može se postići visoka rezolucija, kao u slučaju Betz-ovog manometra, sl.3.3, koji se koristi za mjerenje veoma malih razlika pritisaka.

Sl.3.3 Betz-ov manometar

Pri upotrebi ovih instrumenata treba strogo voditi računa o mjernom opsegu, naročito kada su u pitanju diferencijalni manometri u kojima se nalazi živa (toksična materija). Ukoliko je intezitet mjenog pritiska iznad mjernog opsega, može doći do istiskivanja fluida iz U cijevi u mjerni prostor u pravcu nižeg pritiska.

- **Mehanički manometri.** Princip rada ovih manometara se zasniva na svojstvu različitih vrsta opruga ili mebrana koje se deformišu pod dejstvom pritiska. Upotrebom odgovarajućeg mehanizma ova deformacija se može registrovati na mjernoj skali instrumenta. Najpoznatij tip mehaničkog manometra je manometar sa Bourd-onovom cijevi, prikazan na sl.3.4.



Sl.3.4 Bourd-onov manometar: (a) osnovni djelovi. (b). fotografuja

Opruga manometra je u vidu savijene cijevi od elastičnog materijala koja se deformiše (ispravlja) usled dejstva pritiska. Deformacija cijevi se prenosi na iglu manometra preko prenosnog mehanizma. Umjesto opruge u vidu savijene cijevi mogu se koristiti različite membrane ili dijafragme sa odgovarajućim prenosnim mehanizmom, sl.3.5. Imajući u vidu malu deformaciju membrane, ovi manometri zahtijevaju mehanizme sa velikim prenosnim odnosom. Veoma su osjetljivi na preopterećenje.



Sl.3.5 Manometar sa membranom

- **Elektronski manometri.** Ovi manometri koriste elektronske senzore pritiska. Najčešći tipovi ovih senzora su: piezootporni, kapacitivni, elektromagnetni i piezoelektrični. Sve vrste ovih manometara sadrže elastičnu membranu sa odgovarajućim elektronskim sensorom koji registruje deformaciju membrane pod dejstvom pritiska. U slučaju pijezoopornog manometra to je tanka metalna žica, zalijepljena na membranu i priključena na izvor napona. Usled deformacije membrane dolazi do deformacije žice (izduženje ili skraćnja) usled čega se mijenja njen električni otpor. Ako se žica priključi na električni izvor doći će do promjene napona na njenim krajevima ili inteziteta struje koja teče kroz žicu. Kod kapacitivnog manometra membrana predstavlja jednu stranu kondenzatora, čiji se kapacitet mijenja sa pomjeranjem membrane. Elektromagnetni senzori rade na principu promjene induktivnosti kalema u čijem jezgru se nalazi feromagnet koji se pomjera pri deformaciji membrane. Pijezoelktrični senzori koriste osobine nekih materijala, npr. kristala, da generišu promjenu napona na svojim krajevima kada se izlože dejstvu sile odnosno pritiska. Sve vrste ovih senzora imaju malu vremensku konstantu odnosno relativno visok dinamički odziv, tako da su posebno pogodni za mjerenje dinamičkih pritisaka. Naročito visok odziv imaju piezoelektrični davači. Na sl.3.6 je prikazan piezoelektrični manometar, sa odgovarajućim procesorom.



(a)



(b)

Sl.3.6 Pijezoelektrični manometar. (a) senzor sa transduserom. (b) procesor

Karakteristike ovog sistema su: opseg 100 bar, tačnost $\pm 0.5\%$ opsega, vreme odziva 2 ms.

4. MJERENJE BRZINE STRUJANJA I PROTOKA FLUIDA

Zapreminski protok, $\dot{V} [m^3/s]$, ili protok fluida kroz neki poprečni presjek je jednak proizvodu površine poprečnog presjeka, A , i brzine strujanja fluida, w_f , u pravcu normale na tu površinu, dok je maseni protok jednak proizvodu zapreminskog protoka i gustine fluida ρ :

$$\dot{V} = w_f A, \quad \dot{m} [kg/s] = \rho w_f A.$$

Ukoliko je brzina strujanja promjenljiva po poprečnom presjeku, potrebno je poprečni presjek izdijeliti na odgovarajuće sekcije, dovoljno male da se brzina strujanja na svakoj od njih može smatrati približno konstantnom, izmjeriti brzinu strujanja i odrediti protok u svakoj sekciji posebno. Ukupni protok je jednak sumi protoka po pojedinim površinama ili proizvodu srednje brzine strujanja, \bar{w}_f , i površine A ;

$$\dot{V} = \sum w_{fi} A_i = \bar{w}_f A.$$

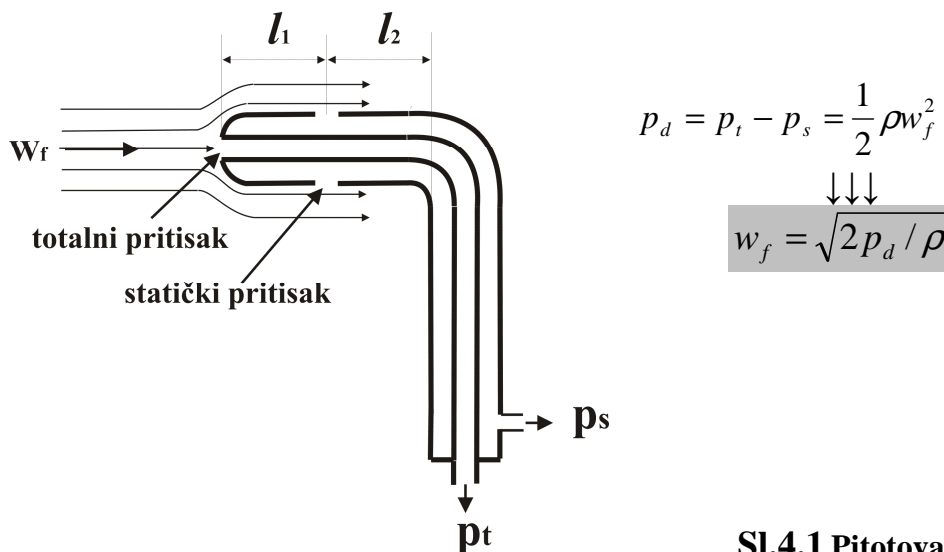
Mjerenje protoka se, prema tome, svodi na mjerenje brzine strujanja fluida. Kada je površina senzora instrumenta za mjerenje brzine strujanja zanemarljivo mala, takav instrument mjeri brzinu strujanja u datoj tački strujnog presjeka. U suprotnom, instrument mjeri srednju brzinu strujanja kroz površinu koju obuhvataju senzori instrumenta. S obzirom da je ta površina poznata ovi instrumenti mogu mjeriti istovremeno srednju brzinu strujanja i protok fluida kroz tu površinu.

Instrumenti za mjerenje brzine (protoka) se mogu svrstati u sledeće osnovne grupe: diferencijalni, linearni, toplotni i optički.

Diferencijalni instrumenti

Princip rada ovih instrumenata se bazira na mjerenju pada (razlike) pritiska pri strujanju fluida kroz ili oko neke prepreke. Najpoznatiji su: Pitotova ili Prandtlova sonda, blenda i venturijeva cijev. Statički odziv ovih instrumenata je nelinearan a vremenska konstanta relativno visoka. Jednostavne su konstrukcije, precizni i jeftini. Imaju najdužu istoriju i najširu primjenu.

- **Pitotova (Prandtlova) sonda.** Na sl.4.1 je prikazana Pitotova ili pitostatička sonda kojom se može mjeriti totalni, statički i dinamički pritisak. Sastoji se od dvije koncentrične cijevi. Unutrašnja cijev je otvorena na jednom kraju i pozicionirana u pravcu struje fluida koja se zaustavlja na njenom ulazu, tako da na njemu djeluje totalni ili zaustavni pritisak p_t . Na spoljašnjoj cijevi se nalazi niz otvora smještenih po njenom obodu. Brzina strujanja u prvcu ovih otvora je jednaka nuli tako da na njima djeluje statički pritisak p_s . Ako se izlazi iz ovih cijevi spoje na diferencijalni manometar on će pokazivati razliku totalnog i statičkog pritiska, odnosno dinamički pritisak p_d , na osnovu koga se može odrediti brzina strujanja fluida w_f .

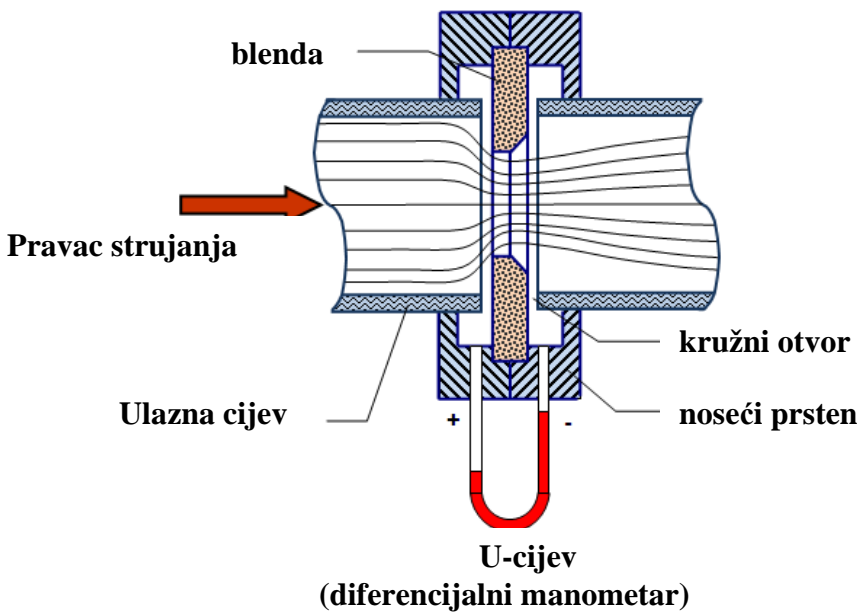


Sl.4.1 Pitotova sonda

Tačnost mjerenja pritiska odnosno brzine strujanja Pitotovom sondom zavisi od niza parametara, od kojih su najvažniji: prečnik i pozicija rupica, ugao nagiba brzine u odnosu na osu sonde, udarni talasi pri velikim brzinama strujanja, neuniformno strujno polje, začepljenje otvora itd. Prečnik rupica se kreće u granicama od 2-5 mm, da ne bi došlo do njihovog začepjenja. Izmjereni statički pritisak je nešto veći od stvarnog. Greška je zanemarljiva za relativno visoke brzine strujanja (ispod 2%). Za izuzetno visoke brzine strujanja se koriste sonde

specijalnog oblika. Da bi se izbjegao uticaj zakrivljenosti strujnica pri opstrujavanj vrha i nosača sonde, rupice za mjerenje statičkog pritiska moraju biti na rastojanjima $l_1 \geq 4d$ i $l_2 \geq 16d$, pri čemu je d prečnik sonde. Sonde nijesu osjetljive na male uglove nagiba u odnosu na struju fluida. Greška mjerenja je praktično zanemarljiva za uglove nagiba manje od 10^0 . Sonda se, u principu, koristi u uniformnoj struji fluida. Gradijenti pritiska i brzine u ravni normalnoj na osu sonde mogu uzrokovati značajne greške mjerenja. Do začepljenja sonde može doći ako se koristi u fluidu koji sadrži nečistoće ili ako dodje do zamrzavanja vlage pri niskim temperaturama. Smatra se da je veći broj udesa putničkih aviona bio posledica grešaka u određivanju brzine strujanja ovim sondama.

- **Blenda.** Blenda predstavlja neki prigušni element koji se ugrađuje u cjevovod, sl.4.2. Usled smanjenja poprečnog presjeka dolazi do ubrzanja struje fluida i intezivnog vrtloženja u prostoru iza blende, što uslovljava pad pritiska u presjeku neposredno iza blende.

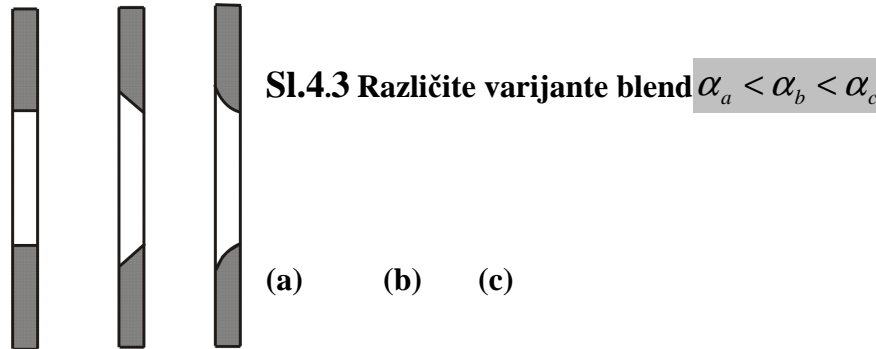


Postavljanjem Bernulijeve jednačine za presjke ispred i iza blende dobijaju se sledeći izrazi za brzinu strujanja w_0 , kroz otvor blende A_0 , odnosno za protok fluida \dot{V} :

$$w[m/s] = \alpha \sqrt{\Delta p / \rho}, \quad \dot{V}[m^3/s] = \alpha A_0 \sqrt{\Delta p / \rho}.$$

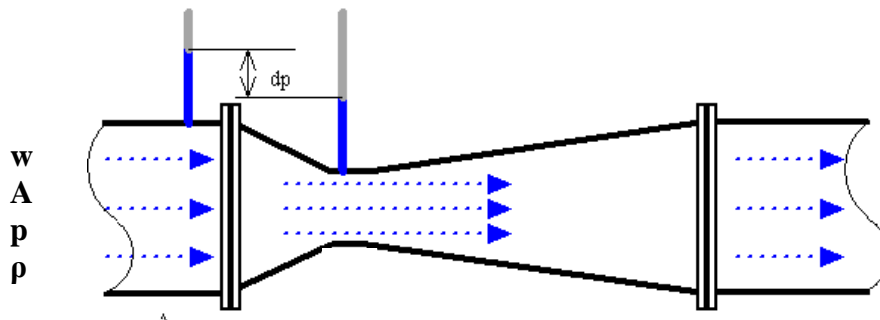
Koeficijent α , poznat kao kefcijent blende, se određuje baždarenjem. Najjednostavniji način je mjerenjem protoka na izlazu iz cjevovoda, pomoću posude poznate zapremine V i štoperice kojom se mjeri vrijeme τ ($\dot{V} = V / \tau$), i razlike pritiska pomoću U-cijevi. Moguće je i baždarenje pomoću nekog drugog instrumenta za mjerenje protoka, poznate tačnosti, koji se veže serijski na istu cijev. Koeficijent, α , blende zavisi od oblika blende, odnosa prečnika otvora

blende i prečnika cjevovoda, brzine i viskoziteta fluida. Pored varijante date na sl.4.2. najčešće se primjenjuju oblici prikazani na sl.4.3, pri čemu otvor blende može biti postavljen i ekscentrično u odnosu na osu cijevi.



Koeficijent α se kreće u granicama $0.6 < \alpha < 0.7$, za blendu prikazanu na sl.4.2. Pored U-cijevi, prikazane na sl.3.1, pad pritiska se može mjeriti različitim vrstama diferencijalnih manometara, zavisno od opsega i željene tačnosti. Blende se najčešće ugradjuju pri montaži cjevovoda i tu ostaju permanentno u cilju kontrole protoka fluida kroz cjevovod. Veoma su jednostavne, pouzdane i jeftine. Loša strana im je što izazivaju pad pritiska odnosno gubitak energije u cjevovodu. Ovaj gubitak zavisi od odnosa prečnika blende i cjevovoda, kao i od oblika blende. Najmanji je u slučaju (c) prikazanom na sl.4.3. Najveći otpor struji fluida generiše varijanta (a), usled oštih ivica, tako da će pri istoj brzini strujanja izazvati najveći pad pritiska.

- **Venturijeva cijev.** Osnovni oblik Venturijeve cijevi je prikazan na sl.4.4.



Sl.4.4 Venturijeva cijev

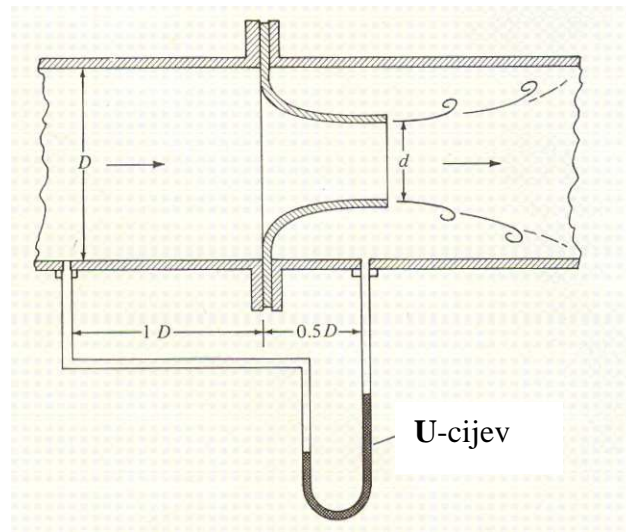
Za razliku od blende, prelaz od presjeka cjevovoda ka najmanjem presjeku Venturijeve cijevi i obratno je postepen. Princip rada venturijeve cijevi je isti kao i kod blende. Postavljanjem Bernulijeve jednačine za presjek neposredno ispred

venturijeve cijevi i njen najmanji presjek dobijaju se isti izrazi za brzinu strujanja i protok, kao i u slučaju blende;

$$w[m/s] = \alpha \sqrt{\Delta p / \rho}, \quad \dot{V}[m^3/s] = \alpha A_0 \sqrt{\Delta p / \rho}$$

Ovdje je koeficijent α znatno veći nego u prethodnom slučaju i njegova vrijednost je bliska jedinici. S obzirom da zbog manjih otpora generiše manji pad pritiska pri istoj brzini strujanja u odnosu na blendu, osjetljivost Venturijeve cijevi je manja u odnosu na blendu, tako da se primjenjuje u slučaju variranja protoka u relativno širokim granicama. Gubici energije u cjevovodu su, također, znatno manji nego u slučaju blende.

Pored oblika prikazanog na sl.4.4, koriste se različite vrste mlaznika, sl.4.5, koji imaju praktično isti koeficijent α kao i Venturijeva cijev.



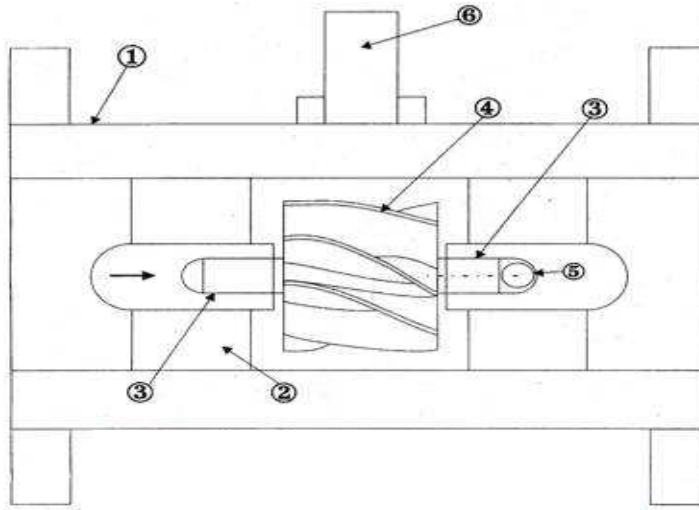
SL.4.5 Mlaznik

Za razliku od Venturijeve cijevi, ukupni pad pritiska odnosno gubitak energije u cjevovodu je približno isti kao i u slučaju blende. Prednost mlaznika u odnosu na blendu je veća otpornost na habanje, što je posebno značajno ukoliko fluid sadrži abrazivne čestice.

Linearni instrumenti

Pokazivanje ovih instrumenata je linearna funkcija brzine strujanja odnosno protoka fluida u relativno širokom opsegu mjerenja. Najpoznatiji su: turbinski, rotametri, ultrazvučni, magnetni i vrtložni. Zavisno od vrste transdjusera mogu biti mehanički i električni. Svi ovi instrumenti mjere srednju brzinu strujanja odnosno protok kroz neki poprečni presjek pa su, prema tome, poznati i kao protokomjeri.

- **Turbinski protokomjeri.** Osnovni elementi turbinskog protokomjera za mjerenje protoka tečnosti, prikazanog na sl.4.6, su turbina, **4**, i indikator broja obrtaja turbine, **6**.



Sl.4.6 Turbinski protokomjer

- 1-kućište
- 2-nosač ležaja
- 3-aksijalni ležaj
- 4-turbina
- 5-radijalni ležaj
- 6-indikator broja obrtaja

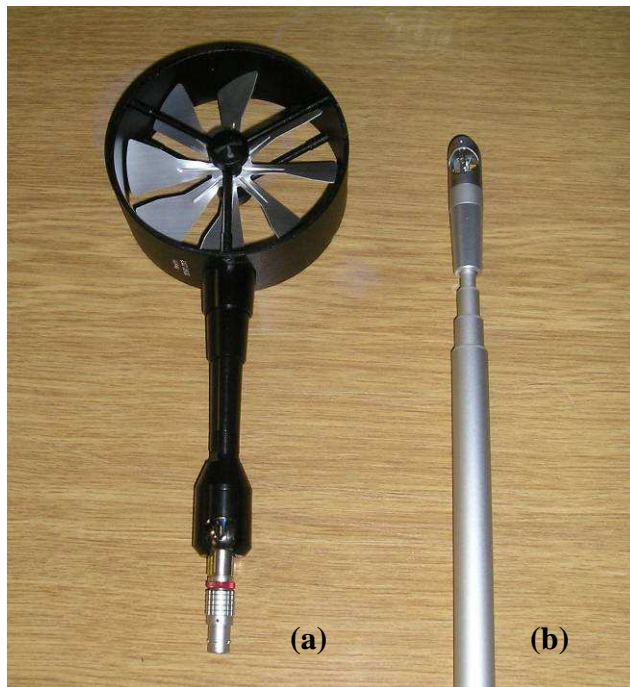
Broj obrtaja turbine je proporcionalan protoku fluida. Može se mjeriti na različite načine, najčešće elektromagnetnim putem. Imaju širok mjerni opseg i visoku tačnost do $\pm 0.25\%$ od mjernog opsega.

Pored konstrukcije prikazane na sl.4.6, sa aksijalnom turbinom, koriste se i rješenja sa radijalno postavljenim turbinama, kao na sl.4.7.



Sl.4.7. Protokomjer sa radijalnom turbinom

Aksijalne turbine se koriste i za mjerenje protoka gasova i para. Na sl.4.8 su prikazane turbine za mjerenje protoka i brzine strujanja vazduha firme "Testo".



Sl.4.8 Turbine za mjerenje brzine i protoka: vazduha. (a) ϕ 100 mm, (b) ϕ 16 mm



Sl.4.9 Turbina za mjerenje brzine strujanja vjetra.

Turbine većeg prečnika su pogodne za mjerenje protoka vazduha na izlaznim ili ulaznim rešetkama kanala sistema za ventilaciju. S obzirom da je raspodjela brzine u ovim kanalima neuniformna, potrebno je obaviti mjerenje na više mjernih mjesta i naći srednju vrijednost protoka. Druga mogućnost je skeniranje poprečnog presjeka kanala, laganim pomjeranjem uključene turbine po porečnom presjeku. U kombinaciji sa odgovarajućim procesorom ovi mjerni sistemi daju srednje vrijednosti brzine i protoka u oba slučaja. Tačnost dobijenih rezultata zavisi od neuniformnosti brzine strujanja fluida. Turbine sa malim prečnikom služe za mjerenje brzine u prorezima i otvorima malih dimenzija. Snadbijevane su odgovarajućom teleskopskom osovinom i omogućuju snimanje brzine i u zatvorenim prostorima pri čemu se turbina postavlja kroz mali otvor na zidu kanala ili komore. Pogodne su i za određivanje lokalnih vrijednosti brzine ispred i iza rešetaka i u presjecima kanala.

Za mjerenje brzine vjetra koriste se turbine čije su lopatice u obliku čašica, sl.4.9. Pri izrazito niskim temperaturama može doći do formiranja sloja leda na lopaticama i relativno velike greške mjerenja.

Rotametri. Princip rada rotametra je prikazan na sl.4.10(a) a njegova fotografija na sl.4.10(b). Sastoji se od konusne cijevi u kojoj je smješten plovak. Pri strujanju fluida kroz cijev na plovak djeluje sila otpora F_r , približno proporcionalna brzini strujanja fluida oko plovka, i težina plovka G . U položaju ravnoteže ove sile su jednake i plovak miruje na određenom rastojanju h od njegove osnove. Da bi plovak bio u ravnoteži, brzina strujanja oko plovka mora biti uvijek ista,