

MJERENJE VLAGE I MOKRINE (*engl. humidity and moisture*):

Vlaga, vlažnost (*engl. humidity*): odnosi se na količinu vodene pare u zraku ili nekom drugom plinu

Mokrina (*engl. moisture*): odnosi se na količinu vode u tekućinama i krutim tvarima.

Primjeri primjene:

- tekstilna industrija: u previše suhoj atmosferi tkanine u pokretu se nabiju statičkim električnom
- višebodni tisak: tiskanje u sljedećoj boji obavlja se nakon sušenja prethodne boje; zbog promjene vlage zraka papir mijenja dimenzije i može doći do nepravilnog slaganja boja
- praćenje promjene mokrine drveta u sušarama
- mjerenje mokrine u žitaricama
- meteorologija

Izvedbe:

- mjerenje relativne vlažnosti pomoću rosišta
- psihrometri
- higrometri s vlaknima (životinjskog porijekla ili sintetičkim)
- otpornički
- kapacitivni
- elektrolitički
- sa samozagrijavanjem
- piezoelektrički
- infracrveni
- mikrovalni
- nuklearni

MJERENJE VLAGE U ZRAKU

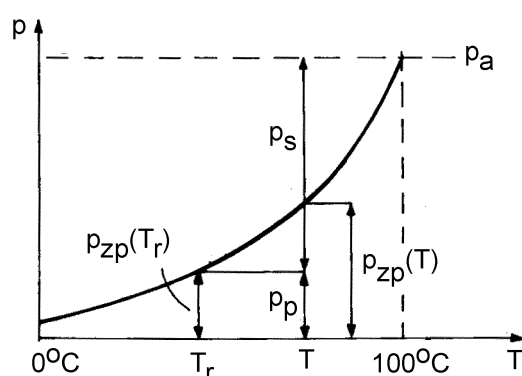
Definicija relativne i apsolutne vlažnosti zraka

Atmosferski tlak zraka (p_a) jednak je zbroju parcijalnog tlaka suhog zraka (p_s) i parcijalnog tlaka vodene pare (p_p):

$$p_a = p_s + p_p$$

Svakoj temperaturi zraka odgovara maksimalna moguća količina vodene pare koju zrak pri toj temperaturi može sadržavati. Pri toj maksimalnoj vlazi kažemo da je zrak **zasićen vodenom parom**. Ako bi u zrak ubacili dodatnu količinu vodene pare došlo bi do kondenzacije.

Ovisnost tlaka zasićene vodene pare (p_{zp}) o temperaturi zraka:



T [°C]	p _{zp} [kPa]
0	0.611
10	1.229
20	2.340
30	4.245
40	7.381
50	12.339
60	19.932
70	31.179
80	47.376
90	70.150
100	101.396

T_r – temperatura rosišta

$p_{zp}(T_r)$ – tlak zasićene vodene pare na temperaturi rosišta

Na određenoj temperaturi okoline T prikazan je atmosferski tlak p_a i odgovarajući tlakovi suhog zraka p_s i vodene pare p_p .

Relativna vlažnost zraka (RV ili RH od engl. *relative humidity*) na određenoj temperaturi jednaka je omjeru tlaka vodene pare i tlaka zasićene vodene pare na toj temperaturi:

$$RV = \frac{p_p}{p_{zp}(T)} = \frac{m_p}{m_{zp}(T)}$$

Apsolutna vlažnost zraka: masa vode u jediničnom volumenu zraka, izražava se u kg/m^3 . Određuje se vaganjem: prvo se izmjeri masa određenog volumena zraka s zatečenim sadržajem vlage. Nakon toga se jakim higroskopskim sredstvom upije sva vlaga iz zraka i izmjeri se masa suhog zraka. Iz ta dva mjerenja izračuna se masa vodene pare po jedinici volumena. Ovakva mjerenja se provode samo u većim meteorološkim institutima.

MJERENJE RELATIVNE VLAŽNOSTI ZRAKA POMOĆU ROSIŠTA:

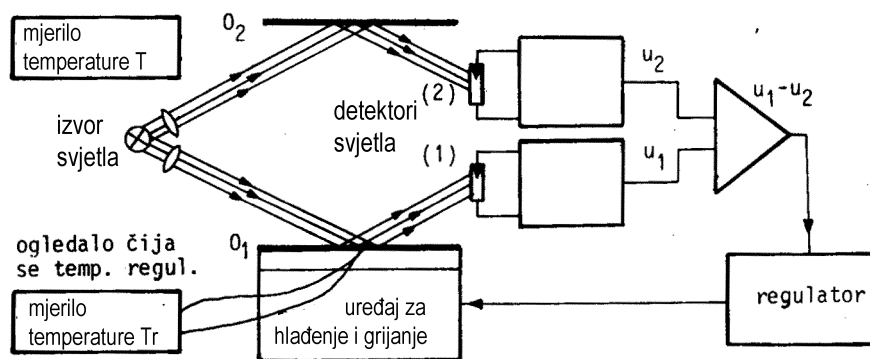
Pri relativnoj vlažnosti manjoj od 100% tlaku vodene pare p_p na temperaturi T odgovara temperatura $T_r < T$ pri kojoj tlak p_p predstavlja tlak zasićene vodene pare $p_{zp}(T_r)$.

Temperatura T_r naziva se temperatura rosišta.

Određivanjem temperature rosišta možemo izračunati relativnu vlažnost zraka prema sljedećem izrazu:

$$RV = \frac{p_{zp}(T_r)}{p_{zp}(T)}$$

pri čemu podatke o $p_{zp}(T_r)$ i $p_{zp}(T)$ očitamo iz tablice ovisnosti tlaka zasićene vodene pare o temperaturi.



Temperatura ogledala O_1 mjeri se pomoću mjerila temperature smještenog neposredno ispod reflektirajuće površine, a regulira pomoću uređaja za hlađenje (Peltier) i grijanje. Kada je temperatura ogledala O_1 veća od temperature rosišta T_r intenzitet svjetla koje pada na detektore svjetla 1 i 2 je jednak pa su prema tome jednaki i naponi u_1 i u_2 . Uz taj uvjet na ulazu, regulator uključuje hlađenje ogledala O_1 .

Kada temperatura ogledala O_1 dosegne temperaturu rosišta T_r na njegovoj površini se formiraju kapi vode koje smanjuju intenzitet svjetla na detektoru 1 a time i pad napona u_1 u odnosu na napon u_2 što uvjetuje uključenje grijanja ogledala O_1 . Temperatura ogledala O_1 poraste iznad T_r , sloj vlage ishlapi pa je ponovo $u_1 = u_2$ i ponovo se uključuje hlađenje. Prema tome, temperatura ogledala O_1 će oscilirati oko temperature rosišta T_r koja se očitava s mjerila temperature.

Uz poznate temperature okoline T i temperature rosišta T_r iz tablice ovisnosti tlaka zasićene vodene pare o temperaturi očitamo vrijednosti $p_{zp}(T_r)$ i $p_{zp}(T)$ i izračunamo relativnu vlažnost.

Prednosti:

- najtočnija metoda, točnost određivanja T_r može iznositi do 0.03°C .

Nedostaci:

- osjetljivost na čistoću ogledala
- velika potrošnja energije
- visoka cijena

PSIHROMETAR (engl. *psychrometer, dry and wet bulb*):

Rad psihrometra temelji se na činjenici da vlažni predmeti zbog isparavanja imaju nižu temperaturu od suhih.

Sastoji se od dva temperaturna senzora od kojih je jedan suh i pokazuje stvarnu temperaturu zraka T dok je drugi omotan vlažnom gazom i pokazuje temperaturu $T_v < T$.

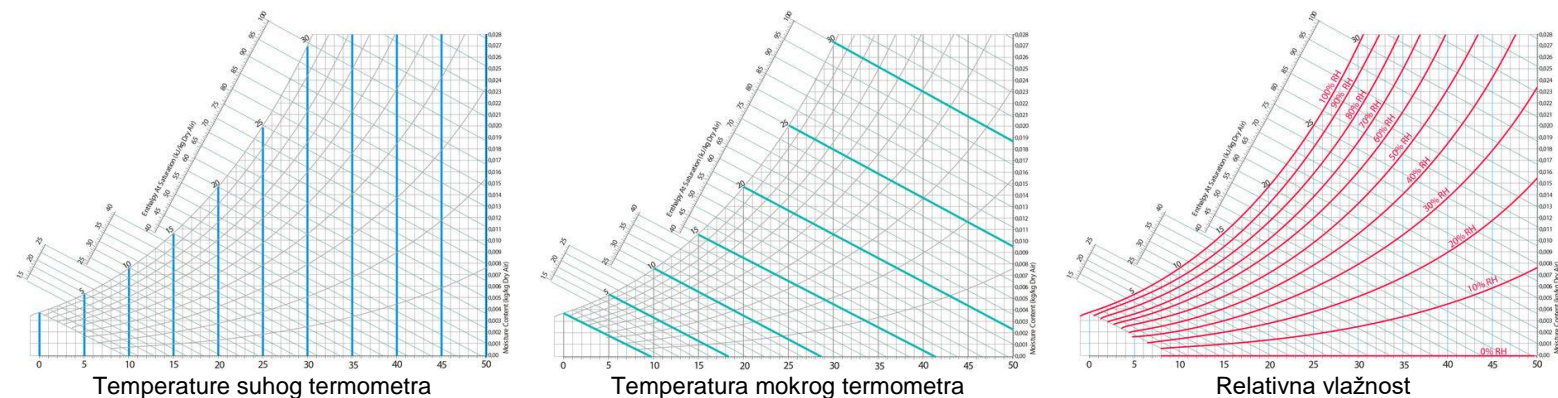
Iz tablice se očitaju odgovarajući tlakovi zasićene pare $p_{zp}(T)$ i $p_{zp}(T_v)$ i izračuna se relativna vlažnost prema izrazu:

$$RV = \frac{p_{zp}(T_v) - A(T - T_v)p_a}{p_{zp}(T)}$$

pri čemu je p_a atmosferski tlak, a A veličina koja prvenstveno ovisi o brzini strujanja zraka. Pri brzinama od 3 do 5 m/s A ima približno konstantnu vrijednost od $(6.35 \pm 0.15) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Prilikom ugradnje psihrometra treba osigurati strujanje zraka u navedenom opsegu brzina.

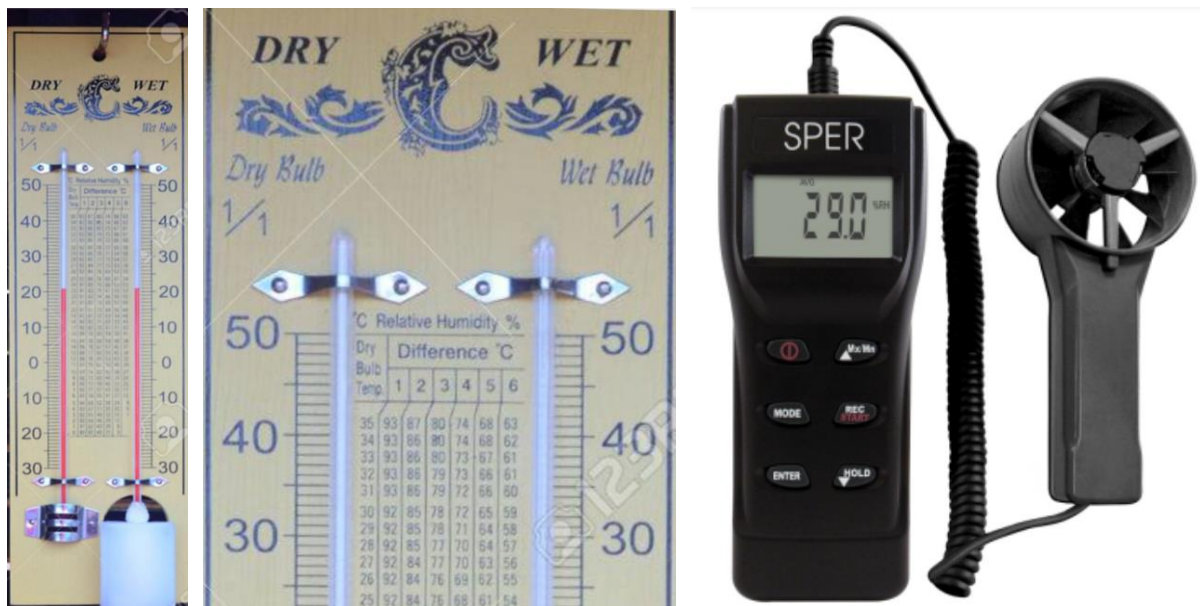
Relativna vlažnost zraka može se odrediti i grafički:



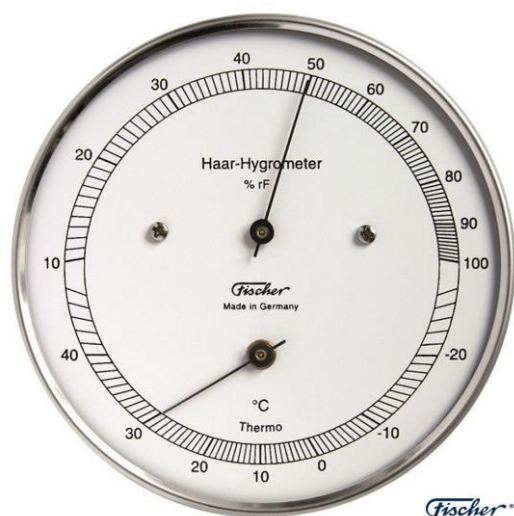
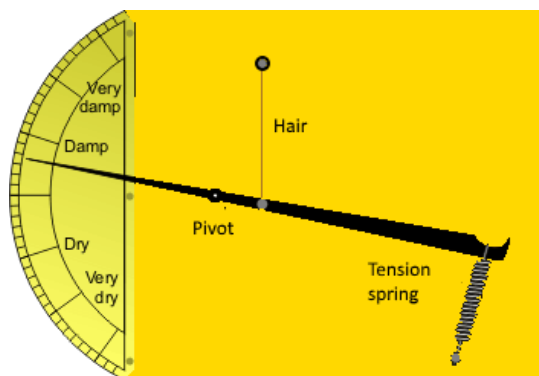
Za mjerenje temperature najčešće se koriste Pt-100 otpornički pretvornici.

Ova metodom se ubacuje dodatna vodena para u zrak, što može biti nepoželjno u nekim situacijama.

Neke od izvedbi:



MJERILA VLAGE S VLAKNIMA (*engl. hair hygrometers*):



Neki materijali kao ljudska i životinjska dlaka te mnoga sintetička vlakna mijenjaju duljinu u ovisnosti o relativnoj vlažnosti zraka. Na tom načelu radi veći broj jednostavnih mjerila vlažnosti zraka.

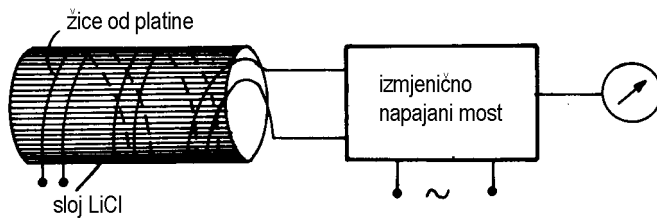
Kao senzor koristi se pramen od desetak vlakana koja su prednapeta pomoću opruge. Promjena duljine uslijed promjene relativne vlažnosti pokreće mehanizam s kazaljkom koja na skali pokazuje relativnu vlažnost. Nakon umjeravanja na temperaturi 15°C do 20°C točnost iznosi 3 do 4% u rasponu temperature od 8°C do 35°C.

Mogu se koristiti za mjerenje u opsegu temperatura od -10°C do 60°C uz prethodno umjeravanje na radnoj temperaturi. Moraju se često umjeravati.



OTPORNIČKI PRETVORNICI VLAGE:

Higroskopni materijali (npr. litijev klorid - LiCl , polistiren, aluminijev oksid – Al_2O_3) imaju sposobnost upijanja vlage iz zraka, pri čemu im se bitno mijenja električki otpor.



Na valjkasto tijelo od izolatora namotane su dvije žice od platine koje se međusobno ne dodiruju. Po cijeloj površini nanesen je sloj LiCl . Povećanjem vlažnosti smanjuje se otpor.

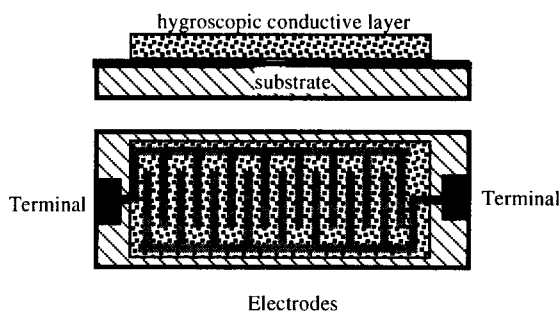


FIGURE 12.6. A composition of a conductive humidity sensor.

Isti pretvornik u pločastoj izvedbi: na supstrat su nanesen vodiči preko kojih je postavljen sloj higroskopnog materijala.

Pretvornik vlage u kojem se kao higroskopni materijal koristi LiCl naziva se "*Dunmore cell*".

Ako se kao higroskopni materijal upotrijebi **polistiren** tretiran sumpornom kiselinom tada se pretvornik naziva "*Pope Cell*".

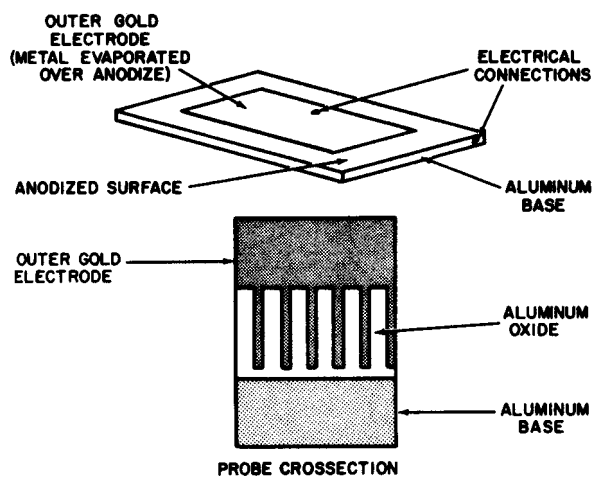


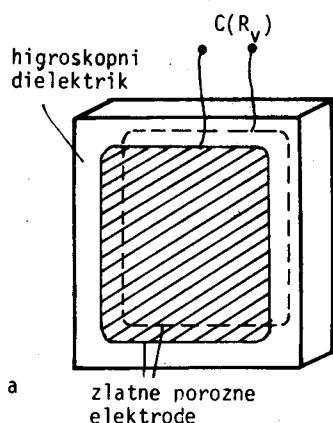
FIG. 8.321
Impedance-measuring sensor.

Na aluminijskoj pločici (prvi kontakt) formiran je porozni sloj aluminijskog oksida. Preko njega je nanesen tanki porozni sloj zlata (drugi kontakt). Vodena para prolazi kroz tanki sloj zlata i apsorbira se u Al_2O_3 sloju. Impedancija ovakvog pretvornika ovisi o količini vlage u Al_2O_3 sloju

Mjerenje se provodi izmjeničnom strujom radi izbjegavanja elektrolize apsorbirane vode. Sklop radi na frekvenciji na kojoj ne dolazi do izražaja kapacitivna komponenta impedancije

KAPACITIVNI PRETVORNICI VLAGE:

Kao dielektrik koristi se higroskopni materijal kojem se uslijed apsorbirane vlage bitno mijenjaju dielektrička svojstva – najčešće su to higroskopni polimeri, debljine 8 – 12 μm dimenzija 12 x 12 mm na čije stranice je naparen tanki sloj zlata čime se formira pločasti kondenzator.



Promjena kapaciteta u ovisnosti o relativnoj vlažnosti zraka (RV) može se približno opisati izrazom:

$$C_{RV} = C_0(1 + \alpha_{RV}RV)$$

pri čemu je C_0 kapacitet pri $RV = 0\%$, a α_{RV} konstanta.

Izvedba kapacitivnog pretvornika vlage u tehnici tankog filma. Na istom supstratu su izvedeni i temperaturni senzori.

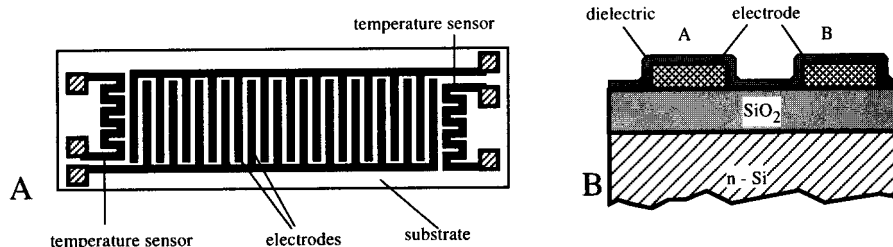


FIGURE 12.4. A capacitive thin-film humidity sensor. A: Interdigitized electrodes form capacitor plates; B: cross section of the sensor.

Karakteristike:

- raspon mjerenja relativne vlažnosti: 5% do 90% u temperaturnom području od 0°C do 50°C
- točnost: 2%

PRETVORNICI VLAGE SA SAMOZAGRIJAVANJEM:

Temelje se na otporničkom pretvorniku s LiCl. Pretvornik se napaja se višim naponom uslijed čega dolazi do zagrijavanja sloja LiCl na temperaturu višu od temperature okoline. Uslijed zagrijavanja isparava se vlaga iz LiCl, povećava se otpor i smanjuje struja kroz pretvornik. Temperatura pretvornika dostiže konstantnu vrijednost pri kojoj se uspostavlja **ravnoteža između brzine isparavanja i upijanja vlage iz okoline**. Temperatura ravnotežnog stanja je viša pri većoj relativnoj vlažnosti zraka, pa se **vlažnost očitava pomoću temperaturnog senzora** koji mjeri temperaturu zagrijanog sloja LiCl. Ne mogu se koristiti za određivanje vode u tekućinama.

ELEKTROLITSKI PRETVORNICI VLAGE:

Kao higroskopni materijal koristi se fosfori pentoksid P_2O_5 kroz koji se propušta **istosmjerna struja**. Apsorbirana vlaga se elektrolizom rastavlja na kisik i vodik čime se povećava otpor pretvornika. **Struja se smanjuje do trenutka kada se izjednačuje brzina elektrolize i brzina apsorpcije vlage iz zraka**. Pri većoj relativnoj vlažnosti zraka je i struja pri kojoj se uspostavlja ravnotežno stanje jača, pa se **vlažnost zraka očitava pomoću ampermetra**.

Posebno su pogodni za mjerenje malih količina vlage (od 1 ppm).

Točnost im je oko 10% pri mjerenju relativne vlažnosti od 1 ppm, kod većih iznosa RV točnost poraste na 5%.

Vrijeme odziva im je oko 1 min.

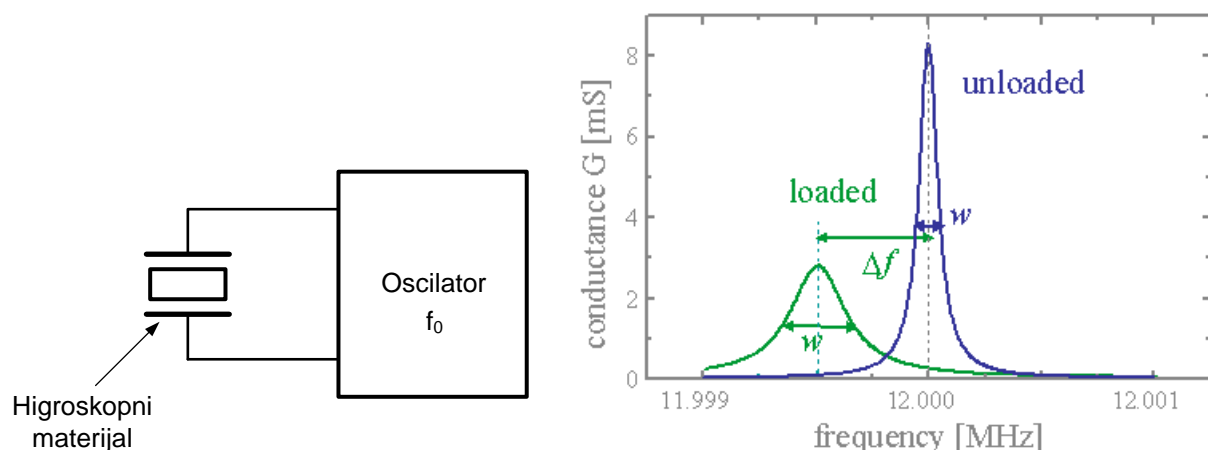
PIEZOELEKTRIČKI PRETVORNICI VLAGE:

Sastoji se od piezoelektričkog kristala obloženog slojem higroskopnog materijala. Pretvornik je spojen u krug oscilatora koji oscilira na rezonantnoj frekvenciji kristala. **Pri povećanju vlažnosti se uslijed apsorpcije povećava masa pretvornika što uzrokuje smanjenje njegove rezonantne frekvencije**. Relativna vlažnost se određuje mjerenjem promjene frekvencije.

Mjerenje se provodi naizmjeničnim puštanjem suhog i vlažnog plina preko pretvornika i određivanjem razlike frekvencija.

Upotreba im je ograničena samo na određivanje vlage u plinovima (ne mogu se koristiti za određivanje vlage u tekućinama). Također nisu upotrebljivi za mjerenje vlage u plinovima koji bi mogli tijekom mjerenja stvoriti talog na pretvorniku.

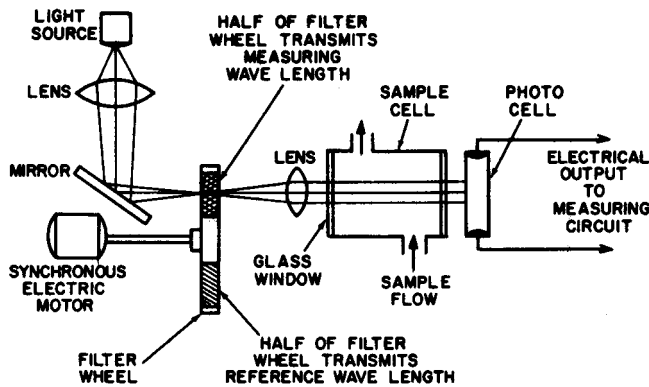
Vrijeme odziva je oko 1 min.



ODREĐIVANJE VLAGE I MOKRINE MJERENJEM APSORPCIJE INFRACRVENOG ZRAČENJA

Koristi se za mjerenja vlage u plinovima i mokrine u tekućinama i krutim tvarima. Temelji se na činjenici da **voda intenzivno apsorbira infracrveno (IC) zračenje valnih duljina 1.43 μm i 1.93 μm .**

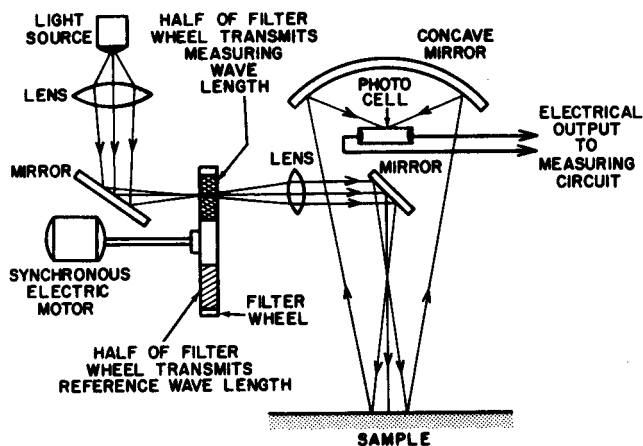
Izvedba mjerila vlage u plinovima i mokrine u tekućinama:



Schematic representation of the infrared moisture detector.

Infracrveno svjetlo prolazi kroz optički filter koji naizmjenice propušta referentnu i mjernu valnu duljinu. IC svjetlo referentne valne duljine voda slabo apsorbira, za razliku od IC svjetla mjerne valne duljine. Na izlazu foto-osjetljivog detektora dobijamo dva impulsa, referentni i mjerni čija amplituda ovisi o količini vlage u mjenom uzorku. Metoda je ograničena na prozirne tekućine i plinove koji ne sadrže dodatne komponente koje bi mogle utjecati na apsorpciju IC zračenja.

Izvedba **mjerila mokrine** u krutim tvarima:



Infrared moisture measurement (reflectance). In microprocessor-based "quadra-beam" designs four channels are used and the measured reflections are ratioed to reduce drift and stabilize the measurement.

Intenzitet reflektiranog IC zračenja ovisit će o količini vlage u uzorku koji se mjeri. Metoda se ne može koristiti za uzorke koji slabo reflektiraju IC zračenje. Budući da IC zračenje ne prodire duboko u materijal, ova metoda daje podatak samo o površinskoj mokrini.

MJERENJE MOKRINE

Odnosi se na mjerenje sadržaja vode u tekućim i krutim tvarima. Definira se kao omjer mase vode i ukupne mase uzorka:

$$\psi = \frac{m_v}{m_u}$$

Temeljni način mjerenja mokrine je **vaganjem**: izmjeri se masa uzorka u izvornom stanju, nakon toga se uzorak potpuno osuši i izmjeri se masa suhog uzorka. Oduzimanjem se dobije masa vode. Uzorak se suši duljim zagrijavanjem do temperature nešto iznad 100°C. Kada se masa uzorka prestane smanjivati znači da je sva voda isparila. Opisana metoda nije primjenjiva u industriji i trgovini zbog sporosti.

Najčešće izvedbe pretvornika za mjerenje mokrine:

- otpornički
- kapacitivni
- apsorpcija infracrvenog zračenja
- nuklearni - usporenje brzih neutrona na atomima vodika
- NMR

OTPORNIČKI I KAPACITIVNI PRETVORNICI ZA MJERENJE MOKRINE KRUTIH TVARI

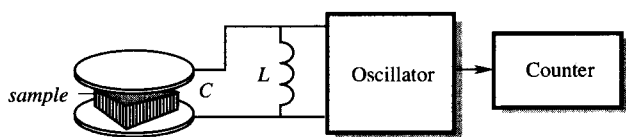
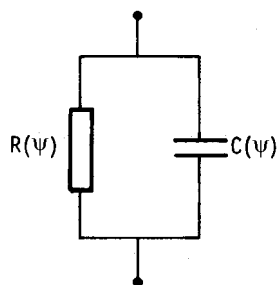
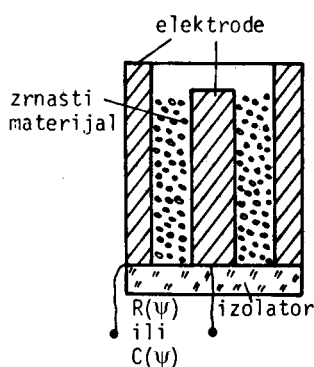
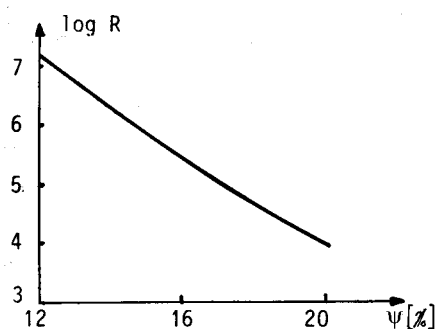


FIGURE 12.3. Capacitive moisture sensing system.

Izvedba koja se koristi za mjerenje mokrine u rasutim teretima (najčešće žitarice) sastoji se od dvije elektrode između kojih se nalazi ispitivani materijal. Elektrode mogu biti pločaste ili češće koaksijalne. Pretvornici za mjerenje mokrine bala pamuka ili vune imaju dva ili više šiljaka koji se zabadaju u ispitivani uzorak.

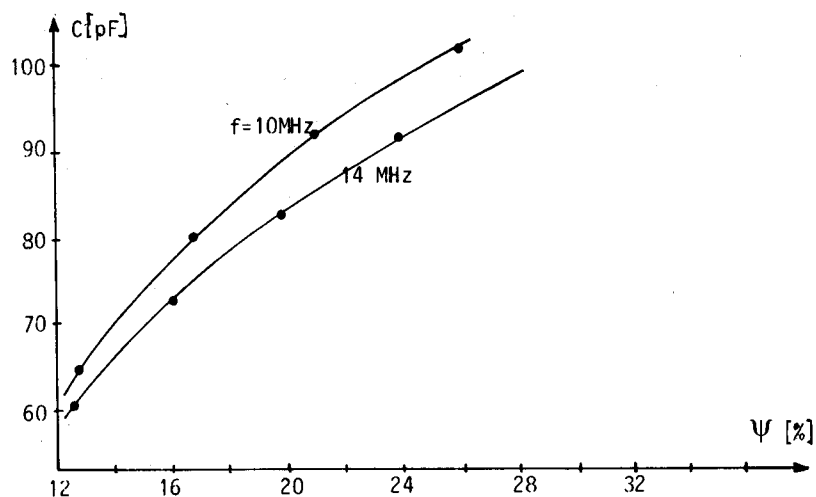


Pretvornik za mjerenje mokrine u rasutim materijalima izveden s koaksijalnim elektrodama – može se koristiti kao otpornički i kao kapacitivni pretvornik, ovisno o radnoj frekvenciji (mjerenje se provodi izmjeničnom strujom zbog izbjegavanja elektrolize vode.)



Otpornički pretvornik:

Otpor se smanjuje povećanjem mokrine. Koristi se niska radna frekvencija, od mrežne do nekoliko stotina Hz radi zanemarenja kapacitivne komponente. Otpor se može mijenjati za tri do četiri reda veličine. Pri porastu temperature otpor se smanjuje pa je potrebno provesti korekciju izmjerene mokrine od približno -0.1% po $^{\circ}\text{C}$.



Kapacitivni pretvornik:

Kapacitet se povećava s povećanjem mokrine. Koriste se radne frekvencije oko 10 MHz radi zanemarenja otporničke komponente.



NUKLEARNI UREĐAJI ZA MJERENJE MOKRINE (engl. nuclear moisture density gauge)

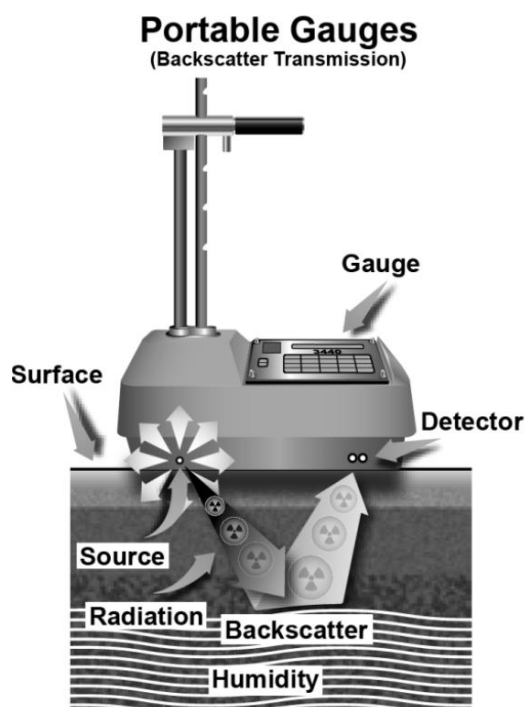
Temelji se na usporejju brzih neutrona u sudaru s atomima vodika. Budući da su neutroni električki neutralni njihova količina gibanja se mijenja jedino uslijed sudara s drugim atomima.

Ako je masa atoma u sudaru jednaka masi neutrona, tada se sva kinetička energija neutrona predaje atomu i brzina neutrona jednaka je nuli.

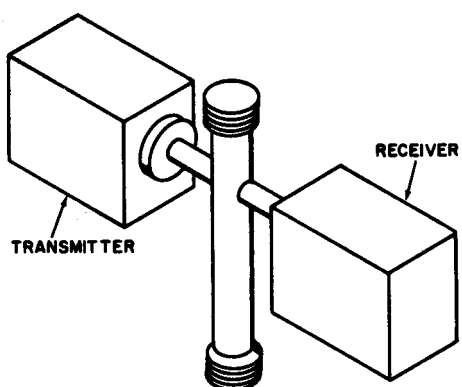
Budući da vodikov atom ima masu približno jednaku masi neutrona on je najbolji apsorber energije neutrona. Prema tome, broj sporih neutrona je mjera količine vodikovih atoma u uzorku. Pri tome treba voditi računa o atomima vodika koji su u kemijskom sastavu uzorka koji se ispituje – ako je to konstanta, može se uzeti u obzir pri kalibraciji.

Kao izvor brzih neutrona koristi se plutonij-berilij ili americij-berilij.

Točnost pri mjerenju mokrine žitarica iznosi oko 0,5% u opsegu mokrine od 0 do 20%.



MIKROVALNI UREĐAJI ZA MJERENJE MOKRINE



Koristi se mikrovalno zračenje frekvencije od 20 GHz do 22 GHz budući da molekule vode najbolje apsorbiraju mikrovalno zračenje u tom frekvencijskom području. Mjeri se intenzitet mikrovalnog zračenja nakon prolaska kroz uzorak ili nakon refleksije od uzorka.

FIG. 8.32p

Microwave sensor installed in pipe.

