

MJERNA I REGULACIJSKA TEHNIKA

Uređuje: Nenad Bolf



N. Bolf*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa
Savska cesta 16/5a, 10 000 Zagreb

Mjerenje vlažnosti

Vlažnost utječe na svojstva plinova (zraka) i tvari koje su s njima u kontaktu. Vodena para ključna je veličina kad govorimo o vremenu i klimi, a predstavlja i atmosferski staklenički plin. O vlažnosti zavise radni uvjeti i odvijanje velikog broj procesa proizvodnje, skladištenja i testiranja.

Količina vodene pare u atmosferi je promjenjiva. Visoka vlažnost čini vrući dan sparnim, dok nam niska vlažnost uzrokuje osjećaj suhoće u grlu. Zrak pri određenoj temperaturi može primiti vodene pare do određene granice kad postaje **zasićen**. Ako se zagrije, zrak je u stanju primiti dodatnu količinu vodene pare. Opadanjem temperature zrak postaje **prezasićen** i jedan dio pare prelazi u kapljevito stanje (kondenzacija), a pri većem snižavanju temperature u čvrsto (sublimacija). Vodena para često je nevidljiva i vlada se kao plin sve dok se ne kondenzira. Čak i bez pojave kondenzacije vodena para može reagirati s površinama i prodrijeti u materijale. Kapacitet plina da zadrži vodenu paru u nekom volumenu ovisi o njegovoj temperaturi: što je temperatura viša, više vodene pare može sadržavati.

Mjerenje vlažnosti primjenjuje se tamo gdje treba spriječiti kondenzaciju, koroziju, pojavu plijesni, deformaciju ili kvarenje proizvoda. To je iznimno važno za hranu, farmaceutske proizvode, kemikalije, goriva, drvo, papir i mnoge druge proizvode. Sustavi klimatizacije u zgradama često reguliraju vlažnost, a znatna količina energija troši se na hlađenje zraka kako bi uklonili vodenu paru. Mjerenje vlažnosti u ovim primjerima korisno je za održavanje optimalnih uvjeta i minimiziranje utroška energije. Stoga, vlažnost ima veliku ekonomsku važnost za održavanje uvjeta u proizvodnji, spremanje sirovina, proizvoda, hrane itd., a posebnu u agronomiji i meteorologiji.

Također je poznato da voda mijenja vodljivost i težinu higroskopskih materijala i kemijskih apsorbera, impedanciju tvari, boju kemikalija, indeks refrakcije zraka i vode, brzinu zvuka u zraku, duljinu organskih materijala, elektromagnetsko zračenje u krutinama, toplinsku vodljivost plinova, kapljevina i krutina. Voda apsorbira infracrveno, ultraljubičasto zračenje i mikrovalno zračenje.

Izražavanje vlažnosti

Apsolutna vlažnost (engl. *absolute humidity*) predstavlja masu vodene pare koju sadrži jedinični volumen plina (zraka). Raste s porastom temperature (npr. povećava se od polova prema ekvatoru). Mjerna jedinica apsolutne vlažnosti je kg m^{-3} ili g m^{-3} .

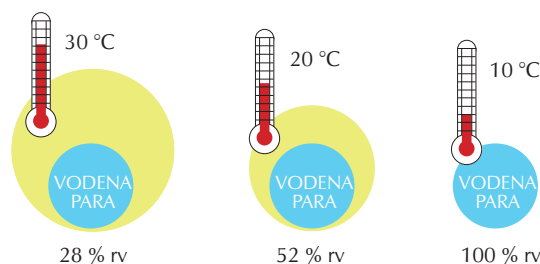
$$\text{apsolutna vlažnost} = \frac{\text{masa vodene pare}}{\text{volumena plina}} \quad (1)$$

$$a = \frac{m(\text{H}_2\text{O}_{\text{gl}})}{V}$$

Relativna vlažnost (engl. *relative humidity*) – relativnom vlažnosti iskazuje se udio vodene pare u zraku (ili općenito u plinovima). Izražava se omjerom parcijalnoga tlaka prisutne vodene pare i parcijalnoga tlaka zasićene vodene pare pri određenoj temperaturi i tlaku zraka. Izražava se i omjerom apsolutne vlažnosti i maksimalno moguće apsolutne vlažnosti. Relativna vlažnost iznosi 0 % kad je zrak potpuno suh, a 100 % kad je zrak potpuno zasićen vodenom parom i počinju se formirati kapljice vode i čestice leda. Prema tome, relativna vlažnost pokazuje stupanj zasićenosti zraka vodenom parom. Obično se izražava u % rv.

$$\text{RV}(\%) = \frac{\text{parcijalni tlak vodene pare}}{\text{parcijalni tlak vodene pare u zasićenom stanju}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2\text{O},\text{zas.}}} = \frac{a}{a_{\text{max}}} \cdot 100$$



Slika 1 – Relativna vlažnost zraka uz istu količinu vodene pare pri različitim temperaturama

Tlak pare (engl. *vapour pressure*) je dio ukupnog atmosferskog tlaka kojem pridonosi vodena para:

$$p_{\text{ukupno}} = p_{\text{N}_2} + p_{\text{O}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{ostali plinovi}} \quad (3)$$

Temperatura rosišta (engl. *dewpoint temperature*) je temperatura do koje se plin treba ohladiti pri stalnom tlaku da postigne zasićenje. Mjera je trenutnog sadržaja vlage na mjernom mjestu.

* Prof. dr. sc. Nenad Bolf
e-pošta: bolf@fkit.hr

Točka rosišta nam govori na kojoj temperaturi trebamo održavati plin kako bismo spriječili kondenzaciju. Točka rosišta je apsolutna mjera vlažnosti plina (vrijedi na bilo kojoj temperaturi) i u izravnoj je relaciji s količinom prisutne vodene pare (parcijalni tlak vodene pare).

Računanje relativne vlažnosti

Parcijalni tlak vodene pare u ravnotežnim uvjetima može se izračunati iz **Antoineove** poluempirijske **korelacije** temperature i tlaka vodene pare u uvjetima zasićenosti:

$$\log p_{\text{H}_2\text{O}} = A - \frac{B}{C + T(^{\circ}\text{C})} \quad [\text{Pa}]$$

$A = 10,2325$
 $B = 1750,286$
 $C = 235$

Izveo ju je francuski inženjer Louise Charles Antoine (1825. – 1897.).

Konstante vrijede na temperaturnom području od 0 do 60 °C pri ukupnom tlaku vlažnog zraka od 1 bar. Na temelju te jednadžbe može se izračunati relativna vlažnost ako se izmjeri temperatura rosišta.

Omjer miješanja (engl. *mixing ration*) je masa vodene pare u jediničnom volumenu zraka podijeljena s preostalom masom suhog zraka. Jedinice su g m^{-3} .

$$\text{omjer miješanja} = \frac{\text{masa vodene pare}}{\text{masa suhog zraka}}; r = \frac{m_{\text{vp}}}{m_{\text{sz}}}$$

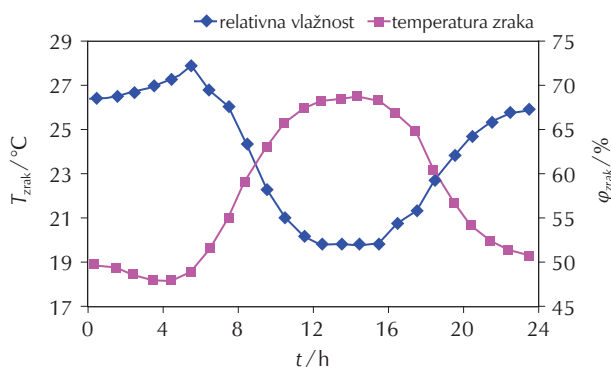
$$r = \frac{\varepsilon p_{\text{H}_2\text{O}}}{(p - p_{\text{H}_2\text{O}})} \quad \varepsilon = \frac{M_v}{M_d} = 0,622 \quad (4)$$

$p_{\text{H}_2\text{O}}$ – tlak para, p – ukupni tlak

Udio ili frakcija vodene pare u plinu može biti maseni, volumni i molni (s obzirom na količinu tvari).

Dnevna promjena relativne vlažnosti

Dnevni hod relativne vlažnosti približno je obratan od dnevnog hoda temperature (relativna vlažnost najveća je ujutro, a najmanja poslije podne!)



Slika 2 – Srednji dnevni hod relativne vlažnosti i temperature zraka u lipnju u razdoblju 1997. – 2001. u Opatiji (prema podacima DHMZ-a).

Odabir mjerila vlažnosti (higrometara)

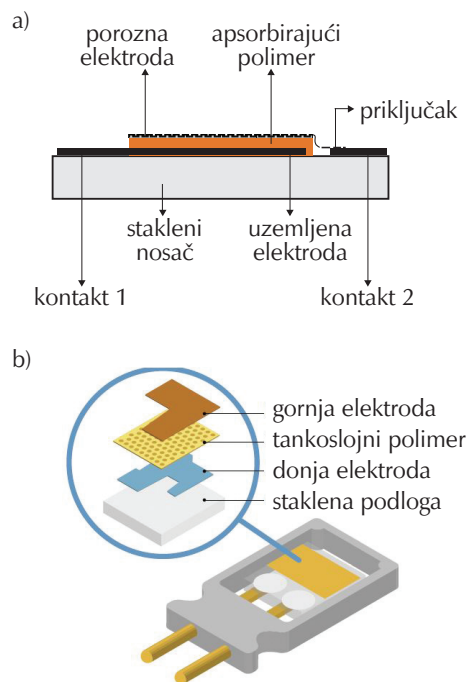
Postoji više različitih metoda mjerenja vlažnosti, stoga pri odabiru instrumenta treba voditi računa o:

- Što mjerite – je li to relativna vlažnost, točka rosišta ili nešto drugo?
- Koje je očekivano mjerno područje vlažnosti i temperature. Javljuju li se ekstremni uvjeti (vruće, vrlo suho ili vlažno)?
- Karakteristike instrumenta (potrebna mjerna točnost, razlučivost, dugoročna stabilnost, brzina odziva, nelinearnost, histereza, temperaturni koeficijent, mjerna nesigurnost kod umjeravanja).
- Ugradnja – sonda mjeri u slobodnom prostoru ili plin prolazi kroz cijev instrumenta? Ručni, prijenosni ili ugradbeni?
- Napajanje – baterija, mrežno napajanje ili bez napajanja.
- Izlazni signal – prikaz, naponski ili strujni ili digitalni izlaz (RS232 itd.), zapis i pohrana podataka.
- Je li potreban alarm ako vlažnost prijeđe definirane granice?
- Služi li mjerenje za automatsku regulaciju vlažnosti ili neke druge veličine?
- Kompatibilnost s plinovima.
- Kontaminacija poput prašine ili kemikalija.
- Upotreba u opasnim zonama (može zahtijevati poseban dizajn i certifikat).
- Troškovi i održavanje, učestalost umjeravanja.

Budući da se promjena vlažnosti očituje na mnogo načina, postoji veći broj higrometara različitih mjernih načela. Treba istaknuti:

Senzor relativne vlažnosti (električna impedancija)

Radi se o higrometru temeljenom na elektroničkoj komponenti koja, ovisno o vlažnosti zraka, apsorbira vodenu paru i mijenja električnu impedanciju (otpor ili kapacitet). Instrument je obično izveden u obliku sonde spojene izravno ili kabelom na jedinicu za očitavanje relativne vlažnosti.



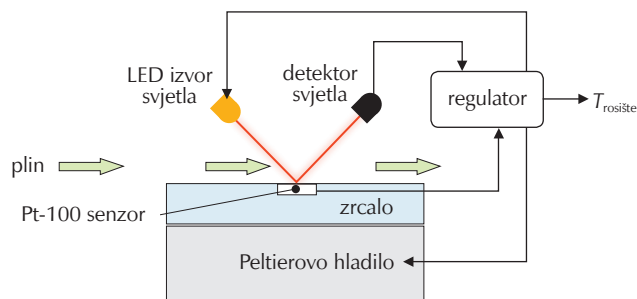
Slika 3 – Presjek kapacitivnog osjetila vlažnosti

Tablica 1 – Mjerna načela higrometara

Vrsta higrometra	Mjerno načelo
Apsorpcijski spektrometar	Infracrveno zračenje koje apsorbira vodena para
Akustični	Akustična transmisija ili rezonancija ovisna o vlažnosti
Adijabatska ekspanzija	Formiranje "oblaka" u komori ekspanzijskim hlađenjem uzorka plina
Promjena boje	Kristali ili tinte u kojima su kobalt klorid ili druge kemikalije Hidratacijom mijenjaju boju
Kondenzacijski	Temperatura stvaranja vode ili leda pri hlađenju vlažnog zraka
Električna impedancija	<i>Senzor relativne vlažnosti</i> – električna promjena pri apsorpciji vodene pare u (obično) polimerni film <i>Sonda rosišta</i> – električna promjena pri apsorpciji vodene pare u porozni film metalnog oksida
Toplinska vodljivost	Promjena toplinske vodljivosti s promjenom vlažnosti
Kapacitivni	Promjena kapaciteta kondenzatora s vlažnosti
Elektrolitički (fosforov pentoksid)	Električna struja proporcionalna je disocijaciji vode na vodik i kisik
Gravimetrijski	Vaganjem – masa vode dobivena ili izgubljena uzorkom vlažnog zraka
Mehanički	Promjena dimenzija materijala osjetljivog na vlagu (kosa, polimer, papir i sl.)
Optičko vlakno	Promjena reflektirane ili propuštene svjetlosti, primjenom higroskopnog premaza ili optičke rešetke
Rezonator kvarcnog kristala	Promjena rezonantne frekvencije zbog mase vode adsorbirane na površini
Zasićeni litijev klorid	Vodljivost higroskopne soli
Mokri i suhi termometar (psihrometar)	Hlađenje vlažne površine ovisno o vlažnosti okolnog plina
Cirkonij	Vlažnost na temelju sadržaja kisika u plinu

Kondenzacijski higrometar

Higrometar koji hlađenjem uzrokuje kontroliranu kondenzaciju. Nakon stabilizacije mjeri se temperatura koja predstavlja točku rosišta ili mrazišta. Standardno se izvodi kao hlađeno zrcalo s optičkim detektorom kondenzacije koja u povratnoj vezi regulira temperaturu zrcala pomoću Peltierova elementa.



Slika 4 – Načelo rada kondenzacijskog higrometra

Mjerenje točke (temperature) rosišta

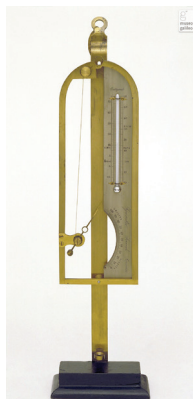
Higrometar temeljen na elektroničkom senzoru koji mijenja električni kapacitet ovisno o apsorpciji vode. Može mjeriti tragove vodene pare u veoma suhim plinovima. Rezultat se prikazuje obično u temperaturnim jedinicama točke rosišta (ili mrazišta), ali i u drugim jedinicama.

Psihrometar (higrometar s mokrim i suhim termometrom)

Higrometar koji za mjerenje vlažnosti primjenjuje načelo hlađenja koje se javlja zbog isparavanja. Budući da se za isparavanje troši toplina, temperatura na mokrom termometru niža je od one na suhom, osim kada je zrak zasićen vodenom parom pa su obje temperature jednake. Što je zrak suši, to je razlika temperatura veća. Iz spomenutih dviju temperatura i tlaka zraka određuje se tlak vodene pare, a odatle i veličine koje određuju vlažnost zraka. Stalna propisana brzina strujanja postiže se priključnim ventilatorom (aspiratorom).



Mehanički higrometar



Higrometar koji se temelji na promjeni duljine kose, polimera ili drugog organskog materijala. Vlas je jednim krajem pričvršćena za okvir, a drugi kraj je omotan oko osovine kazaljke. Vlas se rasteže povećanjem relativne vlažnosti, a steže njezinim smanjenjem. Zbog toga se kazaljka pomiče i pokazuje na skali relativnu vlažnost u postocima. Neki tipovi snimaju na pokretni grafikonu koji se okreće na valjku pokretanom baterijom ili satom. Danas se preferiraju elektronski higrometri, ali su još uvijek u primjeni mehanički (npr. u vremenskim postajama u parkovima gradova).

Što raditi, a što izbjegavati kod mjerenja vlažnosti

- Pročitajte upute i savjete proizvođača;
- Redovito umjeravajte instrument;
- Neka instrument prije mjerenja poprimi temperaturu mjernog mjesta;
- Pričekajte da se očitavanje vlažnosti stabilizira (posebno za suhe plinove);
- Jasno izrazite rezultate. Promjena od 10 % u očitavanju ne znači isto što i promjena od 10 % rv;
- Provjerite svaki higrometar koji je bio izložen ekstremnim uvjetima ili kontaminaciji;
- S osjetilima vlažnosti postupajte pažljivo;
- Nemojte mjeriti izvan temperaturnog područja ili vlažnosti koje je specificirao proizvođač – pojaviti će se mjerna pogreška;
- Izbjegavajte kondenzaciju na mjernom mjestu, osim ako znate da je senzor može tolerirati.

Literatura i dodatne informacije

- S. Bell, The Begginer's Guide to Humidity Measurement, Good Practice Guide No. 124, National Physical Laboratory, UK, 2012.
- apsolutna vlažnost, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=3435> (pristupljeno 28. 11. 2021.).
- relativna vlažnost, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=50960> (pristupljeno 25. 11. 2021.).
- psihrometar, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=50960> (pristupljeno 25. 11. 2021.).
- URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vlagomjer> (pristupljeno 25. 11. 2021.).
- URL: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/inline-images/capacitive-humidity-sensor.jpg> (pristupljeno 25. 11. 2021.).
- URL: https://puntomarinero.com/images/how-to-use-a-hygrometer_2.jpg (pristupljeno 25. 11. 2021.).
- URL: <https://i.pining.com/originals/d0/05/7d/d0057de1910a0cce3eb4c2b5bba050e6.jpg> (pristupljeno 25. 11. 2021.).

EDUKACIJA I TRENINZI

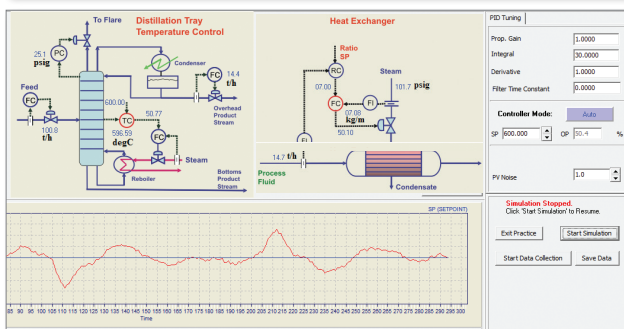
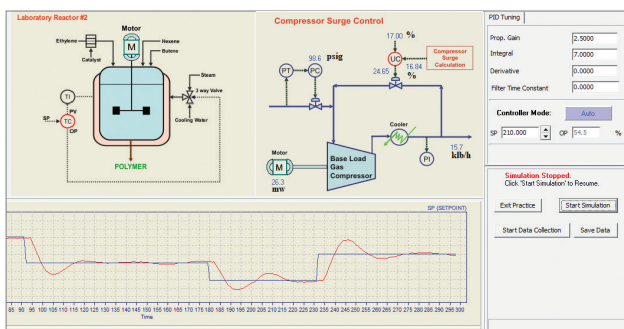


Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije



Praktični seminari uz primjenu interaktivnih simulatora:

- AVP-1 *Automatsko vođenje procesa*
- AVP-2 *Napredno vođenje procesa*
- AVP-3 *Dijagnostika i optimiranje procesa*
- AVP-4 *Procesna mjerenja*
- AVP-5 *Vođenje i optimiranje šaržnih procesa*
- AVP-6 *Statistička analiza procesa*



Na većini postrojenja pravilnom primjenom regulacijske i mjerne tehnike te dobrim održavanjem moguće je postići znatne uštede.

Po završetku ovih praktičnih seminara sudionici će poznavati i razumjeti ključne elemente vezane uz rad, dijagnostiku, mjerenja, vođenje i optimiranje procesa.

Tijekom seminara interaktivno se analiziraju praktični primjeri s realnih postrojenja.

Seminari su važni za stručnjake izravno uključene u proizvodnju, isto kao i za osobe odgovorne za održavanje i optimalni rad postrojenja.

Informacije i prijave putem internetske stranice lam.fkit.hr i bolf@fkit.hr