

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 viskoznosti

Viskoznost je svojstvo bitno u proizvodnji, ali se na inženjerskim studijima uglavnom ne razrađuje dovoljno detaljno. Prema definiciji, viskoznost je svojstvo fluida koji opisuje otpor tečenju. Većina inženjera zna što je viskoznost, ali se problemi javljaju u razumijevanju njezina utjecaja na proces i proizvodnju. *In line* kontinuirano mjerenje viskoznosti omogućuje automatska regulacija viskoznosti procesnih tekućina.

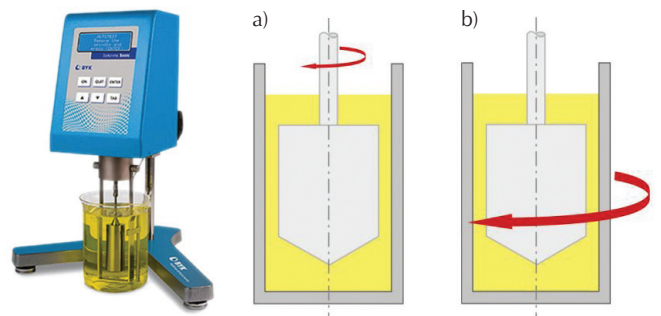
Osnove mjerenja viskoznosti

Tvarima koje teku pri proizvodnji (npr. pumpanja, prskanja ili premazivanja) ili u upotrebi (šampona, detergenata, boja i sl.) važno je definirati karakteristike protjecanja, odnosno viskoznost. Viskoznost se mjeri tijekom kontrole kvalitete kako bismo kvantificirali način protjecanja materijala u procesu ili u primjeni.

Stručnjaci u proizvodnji mogu indicirati/procijeniti viskoznosti ili "konzistenciju" materijala gledajući ga, trljajući ga između prstiju ili ostavljajući da kaplje sa štapa ili lopate. Taj način praktičnog određivanja svojstva materijala razvio se u ponešto znanstveniji pristup primjenom čaša s rupama na dnu (engl. *cups with holes*) pri čemu se zapornom urom (štopericom) mjeri vrijeme potrebno za istjecanje kapljevine. Djelovanje smicanja na kapljevinu zbiva se na otvoru na dnu šalice. Kako se razina u šalici spušta, brzina smicanja na otvoru se smanjuje jer je težina tekućine koja ostaje u čaši manja. Tako se mjeri **kinematička viskoznost** (engl. *kinematic viscosity*). Ta mjerna metoda bila je jedan od najranijih u kontroli kvalitete (engl. *quality control* – QC) kojom se kvantificirala viskoznost.

Metoda šalice ne funkcionira uvijek zbog promjenjive brzine smicanja. Iznimno je važno razumjeti utjecaj brzine smicanja na viskoznost tekućine. Zamislite da je tekućina koju ispitujuete u "sendviču" između dviju ploča razmaknutih na poznatu udaljenost. Držeći donju ploču nepomičnom i pomičući gornju ploču određenom brzinom, brzina smicanja bit će omjer brzine pomicanja ploče i udaljenosti koja razdvaja ploče. Rotacijski viskozimetar koji radi na različitim brzinama može dijelom simulirati što se događa s tekućinom. Taj postupak za simuliranje djelovanja smicanja ključan je za predviđanje načina protjecanja.

Rotacijski viskozimetri, slika 1, dobro su prihvaćeni u industriji. Vreteno rotacijskog viskozimetra rotira se s različitim definiranim brzinama. Istodobno, viskozimetar mjeri okretni moment na vretenu pri tim brzinama vrtnje. Otpor zakretnom momentu i djelovanje na smicanje kombiniraju se u jednadžbi koja definira prividnu ili **dinamičku viskoznost** (engl. *dynamic viscosity*) kao omjer naprezanja smicanja i brzine smicanja.



Slika 1 – a) Viskozimetar na Searleovom načelu – motor okreće mjerni plovak unutar posude ispunjene uzorkom;
b) Viskozimetar na Couetteovom načelu – motor okreće posudu s uzorkom oko fiksnog plovka

Mjerna jedinica za kvantificiranje rotacijske viskoznosti je centipoise (cP) ili milipaskalsekunda (mPa-s) (1 cP = 1 mPa-s). Za koreliranje mjerenja viskoznosti s dinamičkim i kinematičkim metodama za njutnovske tekućine primjenjuje se jednadžba:

$$\text{Dinamička viskoznost} = \text{kinematička viskoznost} \times \text{gustoća}$$

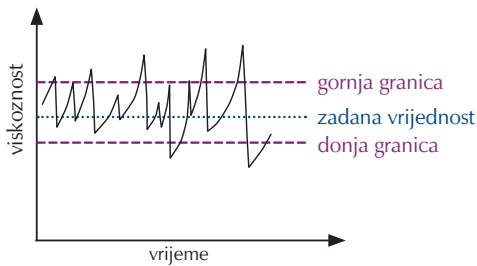
Mjerenje u procesu

Automatska regulacija viskoznosti procesnih fluida osigurava konzistentnost proizvoda, smanjuje vrijeme zadržavanja, eliminira ljudske pogreške i skupa ispitivanja uzoraka. Također, pruža kontinuirani zapis promjene u vremenu, slike 2 i 3. Postoji više načina kontinuiranog mjerenja primjenom rotacijskih viskozimetara, vibrirajućeg elementa ili padajućeg predmeta.

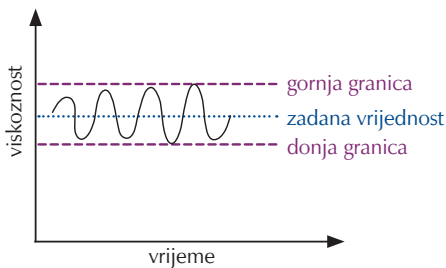
Mjerenje u procesu provodi se *inline* ili u protočnom krugu. Stolni (engl. *bench-top*) rotacijski viskozimetar upotrebljava se za *off-line* mjerenja pri čemu se uzorak izvlači iz procesnog toka i ispituje u kontroliranim uvjetima. S druge strane, *inline* viskozimetri smješteni su u procesnom toku i kontinuirano mjere pod danim procesnim uvjetima. Instalirani mogu biti u bočnom (engl. *side-stream*) toku, u glavnom toku ili, pak, u posebnom spremniku. Pri instalaciji treba paziti da postoji mogućnost čišćenja i održavanja uređaja.

Važno je i da mjereni uzorak bude reprezentativan – instrument mjeri tvar s kojom je u kontaktu. Mogući problemi su stratifikacija, miješanje i turbulencije.

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



Slika 2 – S ručnom regulacijom prekoračuju se gornja i donja granica, pa proizvod može biti izvan specifikacije



Slika 3 – Bolja regulacija može se ostvariti *inline* mjerenjem

Odabir instrumenta za *inline* mjerenje

Prilikom odabira instrumenta za *inline* regulaciju viskoznosti odgovori na sljedeća pitanja eliminirat će neke vrste viskozimetara i pomoći u definiranju prikladnog instrumenta:

- Koliki su minimalni, maksimalni i prosječni **tlak** i **temperatura**?
- Koji je očekivani raspon i željena **viskoznost**?
- Koliki je minimalni, maksimalni i tipični **protok** u procesu?
- **Električna klasifikacija** u zoni mjerenja (npr. ATEX, NEMA 4, NEMA 7)?
- Koji su prikladni **konstrukcijski materijali**, a koji se materijali preporučuju za brtve i elastomere? (Obično je to u skladu s onim što se odabire za drugu procesnu opremu kao što su pumpe.)
- Na kojem **mjestu** će se **montirati** instrument? Shodno tome odabire se npr. prirubnica (slika 4); protočno kućište (slika 5); sonde za otvorene spremnike (slika 6).

Za mjerenja u svrhu regulacije bitni su stabilnost i ponovljivost očitavanja instrumenta i osjetljivost na promjenu viskoznosti u procesu.



Slika 4 – Viskozimetar s vibrirajućom sondom montira se prirubnicom na bok spremnika. Obično se primjenjuje za praćenje i bilježenje promjene viskoznosti.



Slika 5 – Kućište protočnog viskozimetra

Viskoznost (prema kasnolat. *viscosus*: ljepljiv), trenje nastalo pri protjecanju tekućine zbog različite brzine gibanja njegovih slojeva. Uzrok su viskoznosti međumolekulske kohezijske sile u fluidu i adhezijske sile između fluida i krutoga tijela kroz koje se strujanje odvija. Slojevi fluida uz stijenke posude, cijevi i sl. usporavaju brže slojeve. Sila F na jedinicu površine između dvaju slojeva fluida razmjerna je gradijentu relativne brzine v , tj. brzini kojom se relativna brzina gibanja mijenja od sloja do sloja (dy):

$$F = -\eta \, dv/dy.$$

Predznak – pokazuje da sila djeluje suprotno smjeru brzine gibanja. Koeficijent viskoznosti η naziva se *dinamička viskoznost*, a mjeri se u paskalsekundama (Pas). Tako npr. koeficijent viskoznosti glicerina na sobnoj temperaturi iznosi 1,4 Pas, vode 0,001 Pas, a zraka $17 \cdot 10^{-6}$ Pas. Koeficijent viskoznosti smanjuje se s povećanjem temperature jer toplinsko gibanje smanjuje privlačne međumolekulske sile. Koeficijenti viskoznosti različitih stakala, smole i sl., veoma su veliki, u pravilu veći od 10^9 Pas.

Viskoznost fluida uzrokuje i otpor gibanju čvrstih tijela kroz fluid. Sila otpora ovisi o dimenzijama i obliku tijela, brzini gibanja kroz fluid, koeficijentu viskoznosti η i gustoći ρ fluida. Za kuglu polumjera r koja se brzinom v giba u fluidu viskoznosti η , ili se taj fluid giba oko nje, ta je sila jednaka $F = 6\pi\eta vr$ (Stokesov zakon). Taj zakon vrijedi samo za male brzine strujanja fluida (laminarno strujanje). Za veće brzine strujanje postaje turbulentno i sila otpora povećava se s kvadratom brzine.

Kinematička viskoznost omjer je dinamičke viskoznosti η i gustoće fluida ρ , dakle $\nu = \eta/\rho$. Jedinica je kinematičke viskoznosti kvadratni metar po sekundi ($m^2 s^{-1}$), definirana kao kinematička viskoznost fluida kojoj je dinamička viskoznost jedna paskalsekunda, a gustoća jedan kilogram po kubičnome metru.

Viskoznost se javlja i kod plinova, ali ovdje njezin uzrok nisu međumolekulske sile, nego difuzija molekula među slojevima. Difuzija uzrokuje izmjenu impulsa i time izjednačava brzine susjednih slojeva, što je ekvivalentno sili trenja među slojevima, tj. javlja se viskoznost. Utjecaj difuzije u plinovima znatno je manji od utjecaja međumolekulske sile u tekućinama, tako da plinovi pokazuju znatno manju viskoznost od tekućina. Viskoznost kod tekućina opada s temperaturom, a kod plinova raste.



Slika 6 – Viskozimetar s vibrirajućom sondom prikladan za ugradnju na vrhu otvorenih spremnika

Primjena

Većina proizvoda formulirana je tako da protječe, prska se ili podmazuje na kontrolirani način. Nadzor viskoznosti na kritičnim točkama smicanja najopipljiviji je pokazatelj kvalitete. Kako rastu zahtjevi normi (ISO 9000 i procesna analitička tehnologija – PAT), viskozimetri se sve više primjenjuju za postizanje željenih svojstava proizvoda i dokumentiranje. Primjena u kontroli kvalitete, a posebno *inline* viskozimetara za automatsku regulaciju željenih svojstava u velikom je porastu.

Određivanje točke završetka reakcije

Kod nekih kemijskih reakcija viskoznost proizvoda prati se kontinuirano, a kad se dostigne zadana viskoznost, proces se ili završava ili slijede daljnji koraci.

Osim određivanja završetka reakcija na taj se način određuje završetak miješanja višekomponentnih smjesa u šaržnim procesima. Primjer nalazimo u proizvodnji sintetičkih vlakana. Lateks, spandeks i drugi sintetički materijali primjenjuju se u izradi rastezljivih vlakana za odjeću. U reaktoru je, osim regulacije temperature, nužna dobra regulacija viskoznosti.

Rudarenje nafte i plina

Pri crpljenju nafte i prirodnog plina viskoznost se prati i regulira kako bi tekućine imale potrebna reološka svojstva za prijenos krutina. Tako npr. fluid za hidrauličko frakturiranje mora biti takve viskoznosti da pod različitim uvjetima smicanja radni fluid može dovesti na zahtijevano mjesto u bušotini. Tekućina za bušenje mora odnositi strugotine sa svrdla i van bušotine te podmazivati glavu svrdla.

Slijedom toga, potrebno je osigurati brzo i precizno mjerenje viskoznosti, prikupljanje podataka i analizu uzoraka prije upumpavanja u bušotinu.

Dobava ulja za gorionike

Viskoznost fluida kontrolira se da bi se ostvarila pravilna atomizacija pri prolasku kroz mlaznicu za raspršivanje. Pravilno raspršivanje kroz mlaznice uz kontinuirano i precizno mjerenje i kontrolu viskoznosti osigurava najučinkovitije izgaranje. Za sagorijevanje loživog ulja pri velikim protocima u suvremenim kotlovskim jedinicama ulje se mora atomizirati (raspršiti u peći u obliku fine maglice). Tako se ostvaruje velika brzina isparavanja i paljenja. Većina plamenika atomizira ulje u male kapljice. Proizvođa-

či plamenika preporučuju viskoznost goriva koje se dostavlja u plamenik. Ako atomizacija nije odgovarajuća, posljedice su: loše izgaranje goriva uslijed nakupljanja ugljika i čađe; veća potrošnja goriva; povećane emisije ispušnih plinova.

U sustavima pod tlakom *inline* viskozimetri nadziru i reguliraju viskoznost i temperaturu. Višestruka mjerenja viskoznosti potrebna su za učinkovito raspršivanje i isporuku ulja na bazi parafina, kao i goriva za zagrijavanje i otpadnih ulja.

Kontrola kvalitete

Za konzistentnu kvalitetu nekih proizvoda važna je stalna kontrola viskoznosti tijekom proizvodnje. *Inline* mjerenjem informacije dolaze u stvarnom vremenu, pa su laboratorijska ispitivanja potrebna samo povremeno. Time se smanjuje i vrijeme zadržavanja proizvoda u spremnicima. Primjeri, među brojnim, su kontrola i osiguranja kvalitete u proizvodnji šampona, detergenata i jogurta (npr. rijetkog jogurta ili šampona bez "tijela"). Ovdje se radi o percepciji potrošača pri čemu se specifikacije gotovih proizvoda definiraju na temelju ispitivanja grupa potrošača.

Kontrola debljine valjanja

Viskoznost je veoma važna i kod premaza, odnosno nanošenja boja. Pri premazivanju i tiskanju velikih količina proizvoda (npr. milijuna na dan), povrat ulaganja u *inline* mjerenje ostvaruje se vrlo brzo kad se uspoređi s mogućim troškovima tinte, laka ili premaza zbog neadekvatne viskoznosti.

Konstantno održavanje odgovarajuće viskoznosti tinte osigurava kvalitetu ispisa, čime se smanjuje količina otpada i održava minimalni utrošak tinte. Da bi se tinta ravnomjerno raspodijelila na različitim podlogama (kutije, novinski papir, karton, limenke) potrebno je kontrolirati viskoznost. Tu se primjenjuju vibracijski *inline* viskozimetri, slika 7, na više pozicija.



Slika 7 – Vibracijski viskozimetar obično se primjenjuje kod tiskanja i premazivanja

Izvori

- <https://www.chemengonline.com/inline-viscosity-measurements/> (May 1, 2013)
- (By Steve Cicchese, Brookfield Engineering Laboratories | May 1, 2013)
- <https://www.brookfieldengineering.com> (6. 2. 2019.).
- Viscosity: The Basics, Chem. Eng., August 2009, pp. 34–39.
- <https://www.chemengonline.com/viscosity-the-basics/> (6. 2. 2019.).
- <http://www.thermopedia.com/content/1244/> (6. 2. 2019.).
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity> (6. 2. 2019.).
- <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=64830> (6. 2. 2019.).
- <https://wiki.anton-paar.com/en/how-to-measure-viscosity> (6. 2. 2019.).
- <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=64830> (6. 2. 2019.).