UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

MOHOROVIĆ ANGELO, TOPČAGIĆ ZUMRET

Merilniki viskoznosti tekočin

Seminarska naloga pri predmetu Merilni pretvorniki

Ljubljana, 2011

Kazalo

1. Uvod 2
2. Viskoznost 3
3. Kapilarni viskozimetri 7
   3.1 Ostwaldov viskozimeter 7
   3.2 Sayboltov viskozimeter 8
4. Rotacijski viskozimetri 10
5. Viskozimetri s padajočo kroglo 12
   5.1 Höpplerjev viskozimeter 12
6. Padajoč batni viskozimeter 14
Literatura 15

1. Uvod

V današnji tehniki merjenje viskoznosti in razdelitev tekočin, je zelo pomembna.

Danse se kapljevine uporabljajo v različne namene. In če želimo optimalno delovanje katerekoli naprave, moramo poznati čim več dejavnikov, kateri vplivajo na samo delovanje naprav. Eden od teh dejavnikov je tudi viskoznost.

V avtomobilski industriji in predelavi olja kot maziva je zelo pomembna viskoznost teh olj. Ali če imamo kakšno koli vrsto maziva moramo vedet njegovo viskoznost.

Če se ukarjamo s hidravliko, neodvisno od sistema in koncepta hidravličnih naprav, je eno od najbolj pomembni dejavnikov, katero kapljevino (tekočino) bomo uporabili oziroma kakšno viskoznost ima tekočina.

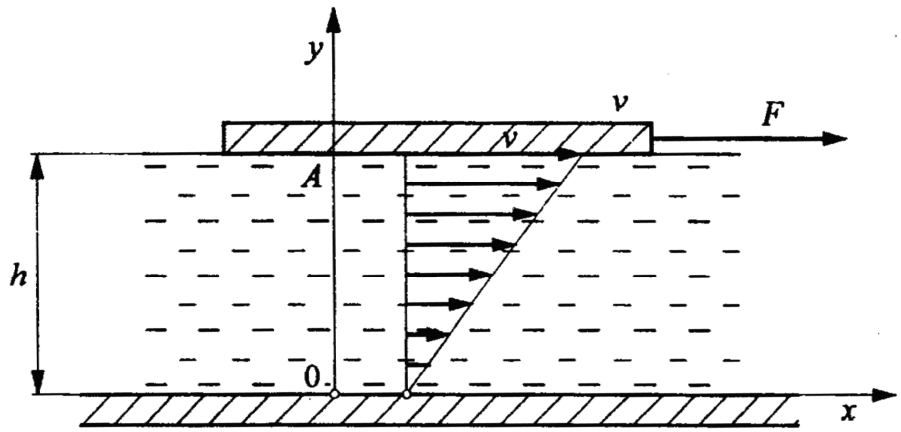
V različnih cevovodih izračun pretokov in moci črpalk je odvisen od viskoznosti tekočine katero imamo v cevovodu.

Pri prenosu tekočin v različnih sistemih viskoznost tekočin jej vplivni faktor na energijske izgube tega sistema. To je tudi pomembno v naftni industriji, zaradi velikosti samega sistema.

Torej, neodvisno od veje industrije, kjerkoli se pojavi tekočina, če želimo določiti določene parametre, moramo poznati viskoznost tekčine.

2. Viskoznost

Viskoznost je pri tekočini merilo odpora proti tangencialnim silam in kotnim deformacijam delcev tekočin. Vpliv viskoznosti bomo podali z modelom, ki je narisan na sliki 2.1. Med dvema dovolj velikima vzporednima ploščama, ki sta razmaknjeni za *h*, je tekočina. Spodnja plošča miruje, zgornja pa se pod vplivom delovanja sile *F* giblje s hitrostjo *v*. Površina zgornje plošče, ki je v stiku s tekočino, je *A*. Delci tekočine, ki so neposredno na spodnji plošči, mirujejo, drugi, ki so na gornji plošči, pa se gibljejo z enako hitrostjo kot plošča, torej s hitrostjo *v*. Če razdalja *h* in hitrost *v* nista prevelika in ni spremembe tlaka v smeri osi *x*, je potek hitrosti ostalih delcev tekočine linearen [1, 4].



Slika 2.1: Potek hitrosti med vzporednima ploščama

Eksperimentalno je dokazano, da je sila *F* premosorazmerna površini *A* zgornje plošče, hitrosti *v* in obratno sorazmerna razdalji *h*. Označimo koeficient proporcionalnosti z η in opisani zakon, ki ga je prvi podal Newton, zapišemo v obliki

$$F = \eta \cdot \frac{A \cdot v}{h}. \tag{2.1}$$

V enačbi (2.1) je η dinamična viskoznost tekočine med ploščama. Enota dinamične viskoznosti je [kg m^{-1} s^{-1}] = [Ns m^{-2}] = [Pa s], paskal-sekunda [3].

Kot je bilo že omenjeno morata biti za veljavnost Newtonove enačbe (2.1) izponjena pogoja o majhni razdalji *h* in hitrosti *v*. V tem primeru gre za laminarni tok (slojeviti tok). Če bi hitrost povečali, bi se urejeni laminarni tok spremenil v turbulentnega, kjer prihaja do intenzivnega medsebojnega mešanja delcev tekočine in za takšen tok Newtonov zakon ne velja.

Sila *F*, ki je podana z izrazom (2.1), povzroča strižno napetost

$$\tau = \tau_{yx} = \frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{v}{h}, \tag{2.2}$$

ki predstavlja drugi način zapisa Newtonovega zakona. Ker gre za linearni potek hitrosti po površini, je napetost τ konstantna po višini.

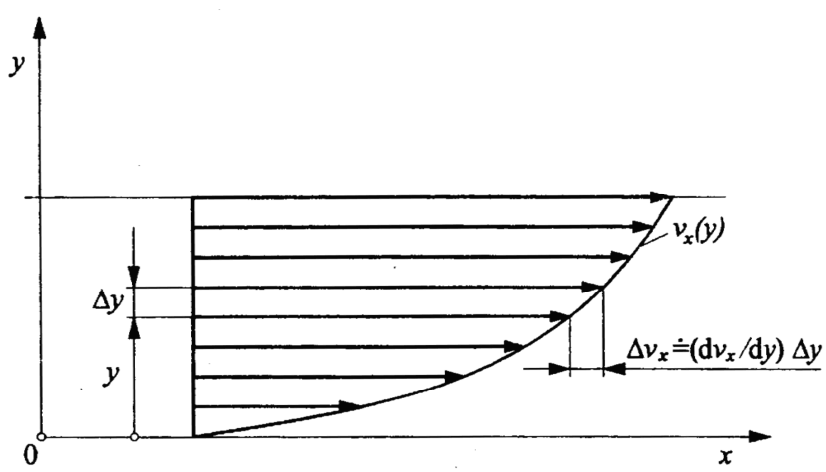
Razen dinamične viskoznosti η uporabljamo še kinematično viskoznost υ, ki je definirana z izrazom:

$$\upsilon = \frac{\eta}{\rho}. \tag{2.3}$$

Kinematična viskoznost je kvocient dinamične viskoznosti in gostote tekočin. Enota kinametične viskoznosti je kvadratni meter na sekundo, [m^2 s^{-1}] [3].

Če pa se pojavi sprememba tlaka v smeri osi x, potem nimamo linearnega poteka hitrosti. Vendar lahko Newtonov zakon zapišemo za sloj debeline Δy. Ta spememba hitrosti ustreza hitrosti v v enačbi (2.2) in Δy ustreza višina h. Tako je tagencialna napetost na oddaljenosti y (slika 2.2) podana z enačbo

$$\tau = \tau_{yx} = \eta \cdot \frac{dv_x}{dy}. \tag{2.4}$$

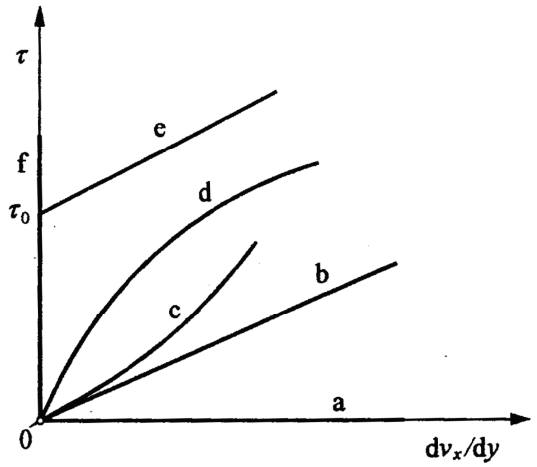


Slika 2.2: Nelinearni potek hitrosti

Enačba (2.4) je splošna oblika Newtonovega zakona viskoznosti za poljuben potek hitrosti laminarnega toka. Izraz dv_x/dy predstavlja hitrost kotne deformacije elementa tekočin.

Tekočine, ki se podrejajo Newtonovemu zakonu viskoznosti, imenujemo newtonske tekočine, med katere sodijo: voda, olje, zrak in druge kapljevine in plini, ki jih najbolj pogosto srečamo v tehniki.

Posebna veja v mehaniki, ki se ukvarja z modeli zveznih snovi, ki imajo različne lastnosti napetosti, deformacij in hitrosti deformacij, je reologija [1]. Na sliki 2.3 je prikazan reološki diagram za različne snovi. V diagramu je narisana odvisnost tangencialne napetosti τ v odvisnosti od hitrosti kotne deformacije dv_x/dy.

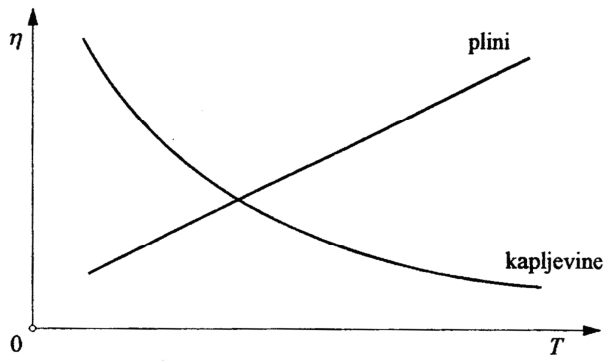


Slika 2.3: Reološki diagram značilnih snovi. a – idealna neviskozna, b – newtonska, c – dilatantna, d – psevdoplastična, e – idealna plastična, f – idealno elastična

Posamezne krivulje karakterizirajo naslednje snovi [1, 3, 4]:

a) *idealno neviskozno* (η = 0), ki ne nudi nobenega tangencialnega odpora proti kotnim deformacijam,
b) *newtonska snov*, kjer je zveza med napetostjo in hitrostjo deformacije linearna (voda, olje, zrak, ...),
c) *dilatantna snov* (mpr. oljne barve, tiskarske barve itn.) imajo spremenljiv potek tangencialnih napetosti v odvisnosti od hitrosti deformacije, vendar jim viskoznost raste s hitrostjo deformacije,
d) *psevdoplastična snov* (npr. emulzije, smole) ima spremenljiv potek tangencialnih napetosti v odvisnosti od hitrosti deformacije in jim viskoznost upada z večanjem hitrosti deformacije,
e) *idealno plastična snov* (to je snov med trdno in kapljevito snov), pri tej snovi je potrebna začetna napetost τ_0, da le-ta postane funkcija hitrosti deformacije; med te snovi štejemo npr. masti, različne kote, mulj v odpadnih vodah, paste itn.,
f) *idealno elastična snov*, napetost ni odvisna od hitrosti deformacije.

Viskoznost je odvisna od temperature tekočin [1, 4]. Pri kapljevinah se viskoznost manjša z višanjem temperature, pri plinih pa ravno nasprotno (slika 2.4). Zato je pri podatku o viskoznosti treba navesti še referenčno temperaturo.



Slika 2.4: Dinamična viskoznost v odvisnosti od temperature

Viskoznost merimo z instrumenti, imenovanimi viskozimetri.

3. Kapilarni viskozimetri

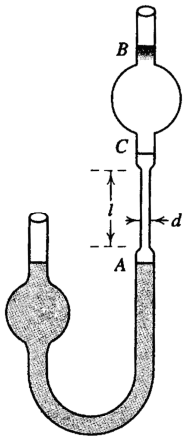
Tipična predstavnika kapilarnih viskozimetrov sta Ostwaldov in Sayboltov viskozimeter. Viskozimeter podoben Ostwaldovem je Bingham tip, Sayboltovem viskozimetru pa sta podobna Redwoodov in Englerov viskozimeter. Vsi ti viskozimetri pri merjenju vključujejo laminarni pretok določenega volumna merjene tekočine skozi kapilaro ali cevčico pri standardni temperaturi. Preko časa, ki je potreben za celoten pretok tekočine skozi dve točki na kapilari, pridemo do kinematične viskoznosti tekočine. Pretok skozi kapilaro lahko ustvarimo s pomočjo gravitacijske ali pa s pomočjo zunanje sile, kje dva konca kapilare izpostavimo različnima pritiskoma. Kapilarni viskozimetri omogočajo direkten izračun viskoznosti s pomočjo znanega pretoka, tlaka in fizičnih dimenzij instrumenta. Večina viskozimetrov predhodno mora biti umerjena z več različnimi tekočinami, ki imajo znano viskoznost. S pomočjo umerjanja pridobimo konstanto za vsak viskozimeter [2].

Sestavni deli kapilarnih viskozimetrov so:

- posoda za tekočino,
- kapilara znanih dimenzij in lasnosti,
- merilnik pritiska,
- merilnik pretoka,
- termostat za merjenje temperature tekočine in
- naprava za vzdrževanje konstantne temperature.

3.1 Ostwaldov viskozimeter

Ostwaldov viskozimeter je sestavljen iz ene kapilarne cevi v obliki črke U-ja in z dvema rezervoarja kot je prikazano na sliki 3.1.1.



Slika 3.1.1: Shematski prikaz Ostwaldovega viskozimetra

S tekočino, ki jo želimo meriti, viskozimeter z leve strani cevi napolnimo do nivoja A, potem jo mehansko s sesanjem z desne strani cevi povlečemo do nivoja B, nato pustimo tekočino, da pod vplivom gravitacije pade do nivoja C. Iz časa, ki je potreben, da tekočina pride iz točke B v točko C, dobimo kinematično viskoznost merjene tekočine. Iz fizikalne slike delovanja tega viskozimetra vidimo, da bo čas potreben za pretok merjene tekočine od točke B do točke C, če zagotovimo, da so vsi drugi parametri, ki vplivajo na pretok enaki pri različnih merjenih tekočinah, proporcionalno odvisen od viskoznosti. Zaradi tega se viskozimeter pri merjenju, ko ga napolnimo do nivoja A, potopi v kopelj s konstantno temperaturo in čakamo nekaj časa, da tudi merjena tekočina dobi znano temperaturo kopeli. Meritve izvajamo z istimi atmosferskimi pogoji. Vidimo, da je ta viskozimeter gravitacijskega tipa in zaradi tega moramo zagotovit natančno vertikalno uravnanost viskozimetra [2].

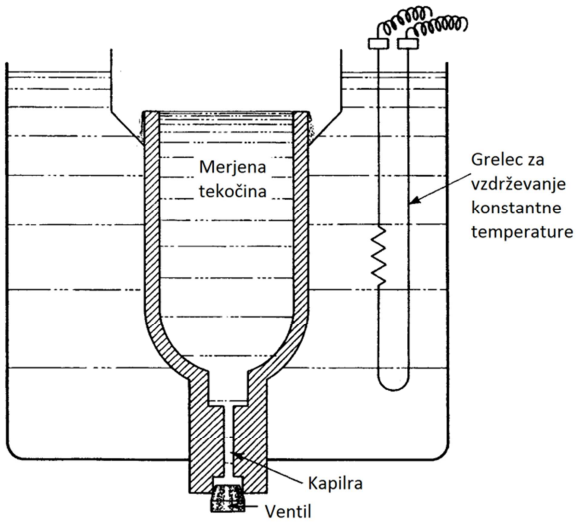
Če je viskozimeter uravnan in ima svojo konstanto K, enačba za kinematčno viskoznost je podana s izrazom

$$\upsilon = K \cdot t \ , \tag{3.1.1}$$

kjer je K konstanta viskozimetra in t merjeni čas potreben za pretok od nivoja B do nivoja C.

3.2 Sayboltov viskozimeter

Saybolt-ov viskozimeter je sestavljen iz cilindrične posode, katera je na dnu zožena v kapilaro, ta kapilara pa ima na koncu ventil. Vse razen ventila je potopljeno v večjo posodo z grelno tekočino in vgrajenim grelcem, zaradi vzdrževanja konstantne temperature. Shematski prikaz Sayboltovega viskozimetra je podan na sliki 3.2.1.



Slika 3.2.1: Shematski prikaz Sayboltovega viskozimetra

Manjšo cilindrično posodo napolnimo z merjeno tekočino, počakamo, da se segreje na določeno konstantno temperaturo, nato ventil odpremo in počakamo, da določen volumen tekočine izteče skozi kapilaro, čas izmerimo in podobno kot pri Ostwaldovem viskozimetru preko izmerjenega časa dobimo viskoznost tekočine [4]. Pretok je definiran z enačbo (3.2.1):

$$Q = \frac{V}{t}. \tag{3.2.1}$$

Kjer je V volumen merjene tekočine in t čas merjenega pretoka, v sekundah.

Da bi pri različnih merjenih tekočin dobili pravo vrednost, moramo imeti konstanten volumen, in ponavadi za to vrsto viskozimetrov znaša 60 cm^3 [4]. Zaradi razlike med začetnim in končnim razmerjem tlakov, ki jih definira enačba (3.2.2)

$$\Delta p = \rho g h\ . \tag{3.2.2}$$

Pri tej vrsti viskozimetrov v enačbi dobimo drugo konstanto K_2, ki kompenzira to razliko med tlakoma pri začetku merjenja in pri koncu merjenja.

Enačba, ki podaja kinematično viskoznost pri tem viskozimetru je (3.2.3)

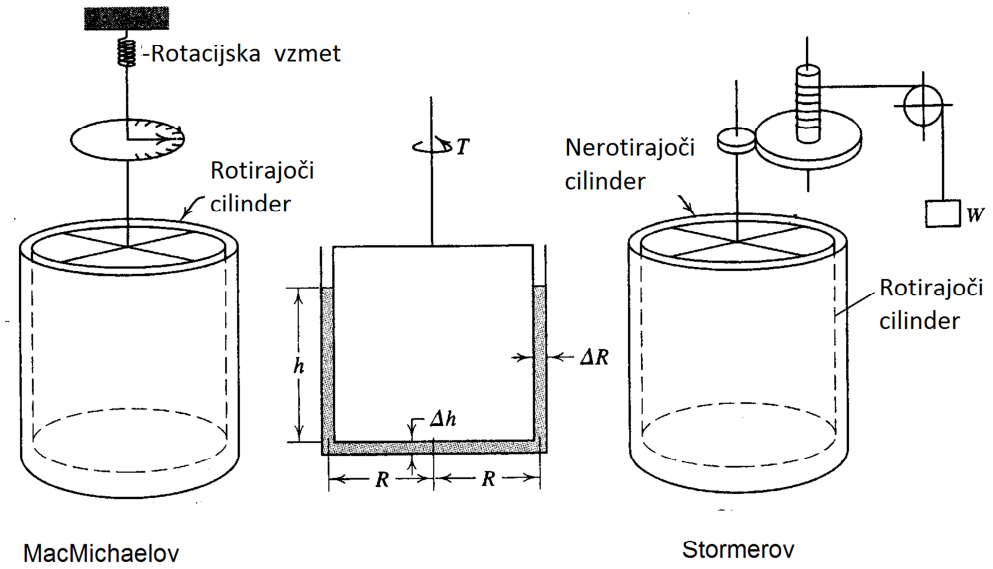
$$\upsilon = K_1 \cdot t + \frac{K_2}{t}, \tag{3.2.3}$$

kjer je K_1 konstanta specifična za instrument.

Sayboltov viskozimeter imenujemo tudi iztočni viskozimeter.

4. Rotacijski viskozimetri

Viskozimetra rotacijskega tipa sta MacMichaelov in Stormerov viskozimetra. Oba sta sestavljena iz dva koncentrična cilindra, ki sta postavljena v isti osi. Prvi cilinder ima manjši radij in je postavljen v drugi cilinder, v prostor med njima pa se vlije merjena tekočina. Viskozimetra sta prikazna na sliki 4.1.



Slika 4.1: Shematski prikaz dveh rotacijskih viskozimetrov

Pri MacMichaelovem viskozimetru, zunanji valj vrtimo s konstantno hitrostjo, to vrtenje zaradi sil med tekočino in cilindroma, vpliva na merilno tekočino, tako da jo začne vrteti, tekočina pa začne vrteti notranji valj, ki je vpet na rotacijsko vzmet in skalo. Odklon vzmeti je potem odvisen od viskoznosti tekočine. Ko ima tekočina večjo viskoznost, večje so sile, ki delujejo med valjoma in tekočino in večji je navor in odklon kazalca. Stormerov viskozimeter ima dva valja, zunaji valj je fiksiran , notranji valj se z mehanizmom, ki je podan na sliki 4.1, zavrti. Ko utež pade na energijsko vrednost nič, začnemo meriti čas vrtenja notranjega valja. Čas vrtenja nam poda viskoznost tekočine. Ko ima tekočina visoko viskoznost, je sila trenja med valjem in tekočino velika, se bo notranji valj hitro ustavil; ko pa je viskoznost majhna, se bo notranji valj vrtel dlje časa [2].

Za MacMichaelov viskozimeter je podana enačba (4.1)

$$\upsilon = \frac{T}{K \cdot N}, \tag{4.1}$$

kjer je K konstanta splošna za viskozimeter, N hitrost vrtenja in T navor.

V Stormerovem viskozimetru je navor konstanten, saj je premosorazmeren z maso *W*, katera je konstanta instrumenta; prav tako je čas *t* potreben za določeno število obratov obratnosorazmernen z *N* ($t = K_2 / N$), sledi enačba (4.2)

$$\upsilon = \frac{T}{K \cdot K_2} \cdot t \,, \tag{4.2}$$

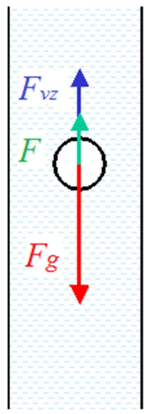
in tako čas potreben za določeno število obratov, zaradi padajoče uteži, postane merilo za viskoznost.

Kot pri kapilarnih viskozimetrih, moramo zagotovit konstantno temperaturo in enake pogoje pri vseh meritva, da bi dosegli natančna merjenja.

5. Viskozimetri s padajočo kroglo

5.1 Höpplerjev viskozimeter

Viskozimeter s padajočo kroglo sloni na dejstvu, da viskoznost tekočine spreminja hitrost padajoče krogle skozi tekočino. Ko krogla z volumnom *V*, polmerom *r* in maso *m* pada skozi tekočino, nanjo delujejo sile prikazane na sliki 5.1.1 [1, 3, 4, 5].



Slika 5.1.1: Sile, ki delujejo na padajočo kroglo skozi tekočino [5]

Na kroglo deluje sila teže

$$F_g = m \cdot g = V \cdot \rho_k \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_k \cdot g \,, \tag{5.1.1}$$

kjer je ρ_k gostota krogle in g gravitacijski pospešek. V nasprotno smer pa deluje sila vzgona F_{vz}. Ta sila je enaka masi izpodrinjene tekočine

$$F_{vz} = V \cdot \rho_t \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_t \cdot g \,, \tag{5.1.2}$$

kjer je ρ_t gostota tekočine. Realna tekočina z dinamično viskoznostjo ustvari upor v nasprotno smer v katero potuje krogla. Ta sila upora *F* je lahko izpeljana iz Stokesovega zakona

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \,, \tag{5.1.3}$$

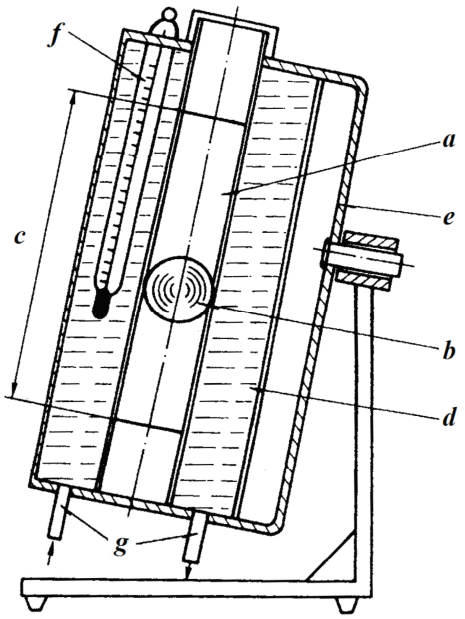
kjer je *v* hitrost krogle. Ker sta sili teže F_g in upora F_{vz} statični in neodvisni od hitrosti *v*, sila upora *F* narašča s hitrostjo. Hitrost bo naraščala vse dokler ne bo vsota vseh sil enaka nič.

$$F_g - F_{vz} - F = 0 \,. \tag{5.1.4}$$

S kombinacijo enačb (5.1.1 – 5.1.3) z (5.1.4) dobimo

$$v = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot g \cdot \frac{\rho_k - \rho_t}{\eta} . \tag{5.1.5}$$

Po enačbi (5.1.5), viskoznost tekočine η lahko določimo s hitrostjo padajoče krogle. Takšen pristop je uporabljen v Höpplerjevem viskozimetru (slika 5.1.2).



Slika 5.1.2: Shematski prikaz Höpplerjevega viskozimetra. a-merilna steklena cev, b-krogla, c-merilna dolžina (100 mm), d-ohišje cevi za nadzor temperature, e-vrtljivi nosilec, f-termometer, g-priključek za nadzor temperature tekočine [3]

Raziskovana tekočina se nahaja v stekleni cevi z dvema oznakam, ki določata razdaljo *L*. Meritev je sestavljena z določanjem časa potovanja krogle od prve oznake do druge. Ta izračun sloni na modificirani enačbi (5.1.5)

$$\frac{L}{t} = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot g \cdot \frac{\rho_k - \rho_t}{\eta} , \tag{5.1.6}$$

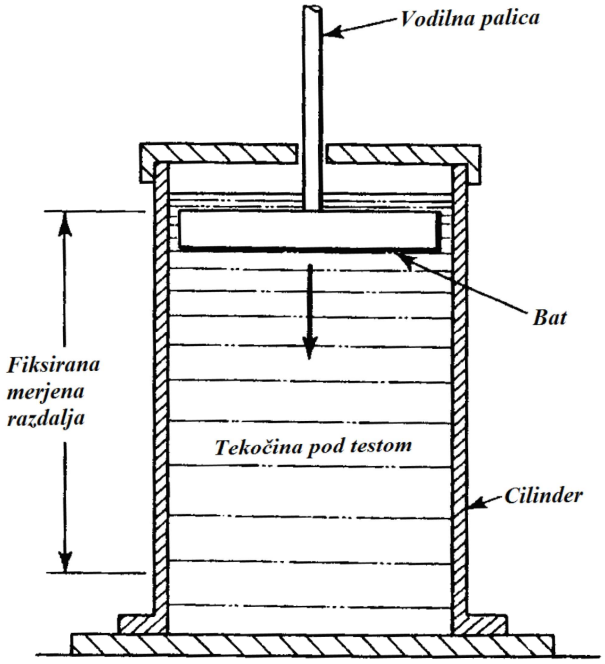
iz katere je določena dinamična viskoznost η

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_k - \rho_t) \cdot t . \tag{5.1.7}$$

Höpplerjev viskozimeter se uporablja v laboratorijske manene, za prozorne tekočine kot so laki, smole, olja, živila, kozmetika, kemikalije itd [6].

6. Padajoč batni viskozimeter

Znan kot viskozimeter Norcross. Princip merjenja viskoznosti v tej robustni in občutljivi industrijski napravi temelji na montaži bata in cilindra. Princip in montaža sta prikaza na sliki 6.1. Bat je periodično dvignjen z mehanizmom na stisnjen zrak, tako črpa snov, ketero merimo, skozi odprtino med batom in steno cilindra v prostor pod batom, ko je ta dvignjen. Montaža je dvignjena nekaj sekund, potem pade na podlagi gravitacije in izloči snov nazaj skozi odprtino. S tem ustvari strižni efekt na merjeno tekočino, zaradi česar je viskozimeter posebej občutljiv in primeren za merjenje določenih tiksotropnih tekočin. Merilo viskoznosti je čas padca, pri čemer odprtino ustvari razdalja med batom in notranjostjo cilindra. Poznejši čas potreben za padec bata se spreminja glede spremembe viskoznosti; višja viskoznost, daljši čas potreben za padec bata.Krmilnik viskoznosti meri čas padca (v sekundah) in prikaže rezultat vrednosti viskoznosti [4].



Slika 6.1: Shematski prikaz padajočega batnega viskozimetra in metoda za določitev relativne viskoznosti [4]

Industrijska uporaba je priljubljena zaradi enostavnosti uporabe, ponovljivosti, nizkih stroškov vzdrževanja in dolgo življensko dobo. Na ta tip meritev ne vpliva pretok tekočine ali vibracije. Princip delovanja je mogoče prejeti za številne različne pogoje, zaradi česar je idealen za procesno kontrolo okolja.

Literatura

[1] J. Stropnik, *Mehanika tekočin*, 1. del – Statika tekočin, Ljubljana, 2001, 12-17

[2] R. L. Street, G. Z. Watters, J. K. Vennard, *Elementary fluid mechanics, Seventh Edition*, John Wiley & sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1996, 632-634

[3] P. Profos, *Handbuch der Industriellen messtechnik*, Eidgen. Technische Hochschule Zürich, Institut für Meβ- und Regeltechnik, Vulkan-Verlag, Essen, 1974, 489-498

[4] P. J. O'Higgins, *BASIC INSTRUMENTATION, Industrial Measurement*, Ryerson Polytechnical Institute, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, St. Louis, San Francisco, London, Toronto, Sydney, 1966, 146-168

[5] The determination of the viscosity of liquids using the Höppler viscosimeter http://www.fpharm.uniba.sk/fileadmin/user_upload/english/Fyzika/viscosity-hoeppler.pdf

[6] Sheen Instruments, Viscosity/Viscometry, Products http://www.sheeninstruments.com/products/viscosity/index.htm