

Viskoznost u građevinarstvu

Turina, Anton

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:578263>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Anton Turina

Viskoznost u građevinarstvu

Završni rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij

Fizika

**Anton Turina
JMBAG:
0114034148**

Viskoznost u građevinarstvu

Završni rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Anton Turina

U Rijeci, 16. rujana 2024.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svima koji su mi bili potpora tokom cjelokupnog studiranja te mentoru uz čiju sam pomoć napravio ovaj završni rad

SAŽETAK

Tema istraživanja je „Viskoznost u građevinarstvu“. Pojašnjene su definicije viskoznosti, dinamičke i kinematičke viskoznosti, pojašnjene su pojave različitih vrsta tekućina te njihovo ponašanje i kretanje u zatvorenim sustavima. Objašnjene su i Bernouillijeva jednadžba te Poiseuilleov zakon. Sažeto su opisani instrumenti potrebni za odredbu viskoznosti tekućina te prikazani fotografijama. Povezana je viskoznost uskim građevinskim materijalima.

SUMMARY

The topic of the research is "Viscosity in construction". The definitions of viscosity, dynamic and kinematic viscosity are explained, the occurrence of different types of liquids and their behavior and movement in closed systems are explained. Bernouilli's equation and Poiseuille's law are also explained. The instruments needed to determine the viscosity of liquids are briefly described and shown with photographs. Viscosity is related to narrow building materials.

Sadržaj

UVOD.....	1
1. TEORIJA VISKOZNOSTI.....	2
2. REYNOLDSOV BROJ.....	3
3. VRSTE TEKUĆINA.....	5
4. BERNOULLIJEVA JEDNADŽBA I JEDNADŽBA KONTINUITETA.....	6
5. POISEUILLE-OV ZAKON.....	8
6. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE HOPPLER-OVIM VISKOZIMETROM.....	9
7. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE ENGLER-OVIM VISKOZIMETROM.....	12
8. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE OSTWALDOVIM VISKOZIMETROM.....	13
8.1.1. Pinkevitchev viskozimetar.....	16
8.1.2. Cannon - Fenskeov rutinski viskozimetar.....	17
8.1.3. Cannon - Manningov polumikronski viskozimetar.....	18
8.2.1. Sil viskozimetar.....	19
8.2.2. Zeitfuchsov viskozimetar.....	20
8.2.3. bs/u - cijevni i bs/u – cijevni minijturni viskozimetar.....	21
9. KORELACIJA GRAĐEVINE I VISKOZNOSTI.....	22
10. ZAKLJUČAK.....	25
11. LITERATURA.....	26
12. POPIS SLIKA.....	27

UVOD

U ovom završnom radu približiti ću temu viskoznosti u građevinarstvu kroz jednostavnije termine, jednadžbe i primjere. Viskoznost je po definiciji otpor tekućine prema strujanju. Približavanjem problemu viskoznosti i njenog utjecaja na građevinske sustave omogućava nam da optimiziramo dizajn primjerice vodovoda, kanalizacije, pumpi, turbina te drugih hidromehaničkih komponenti primjenjivih u građevinskim objektima, konstrukcijama i površinama kao i projektiranju sastava svježeg betonske smjese te asfalta. Rad se bavi proračunom, teorijom, utjecajem na strujanje tekućina i spojem viskoznosti sa građevinskim sustavima. Viskoznost je usko povezana uz dinamiku fluida jer se u statički fluida ona ne događa. U ovom radu baviti ću se isključivo viskoznosti tekućina jer u fluide spadaju plinovi i plazme.

1. TEORIJA VISKOZNOSTI

Viskoznost, žilavost tekućine je trenje nastalo zbog strujanja tekućine radi različite brzine strujanja njenih molekula. Do viskoznosti dolazi uslijed pojave međumolekulske sile kohezije i adhezije između same tekućine i stranog, krutog tijela kroz koje tekućina prolazi. Zakon inercije tj. unutarnjeg trenja definirao je Isaac Newton. Sila viskoznosti je proporcionalna gradijentu brzine i površine slojeva koje su u interakciji:

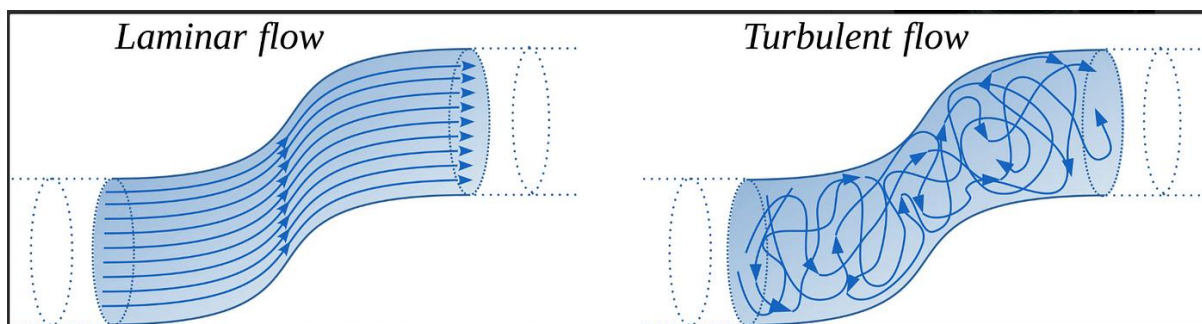
$$dF = -\eta \frac{dv}{dx} dS \quad (1)$$

dF – sila viskoznosti

$\frac{dv}{dx}$ – gradijent brzine

dS – površina slojeva koji se taru

Negativan predznak nam indicira da sila djeluje suprotno od smjera vektora brzine strujanja fluida. Koeficijent viskoznosti η ili dinamička viskoznost označava silu potrebnu za izvedbu jedinične brzine protoka pomoću jedinice površine sloja tekućine po jedinici udaljenosti, a mjeri se u paskalsekundama (Pas). Vodi se po formuli $\eta = \frac{Fx}{Av}$. On ne ovi ni o gustoći ni o tlaku, međutim umanjuje se s povećanjem temperature u slučaju fluida, jer toplinsko strujanje smanjuje privlačne sile između molekula fluida. Konkretno koeficijent viskoznosti za vodu iznosi 0,001 Pas, dok je za krute tvari on u pravilu mnogo veći, preko 10^9 Pas. Ovaj zakon vrijedi za tekućine male brzine strujanja tj. laminarno strujanje kod kojeg sve čestice u istom sloju fluida imaju istu brzinu te se svi slojevi kreću paralelno. Kada se poveća brzina slojevi se miješaju i gibanje postaje turbulentno.



Slika 1 : Prikaz laminarnog i turbulentnog strujanja

2. REYNOLDSOV BROJ

Po definiciji Reynoldsov broj predstavlja omjer inercijskih i viskoznih sila unutar tekućine. Bezdimenzionalna veličina koja nam služi kako bi okarakterizirali način strujanja u fluidu. Koristimo ga kod projektiranja i određivanja načina strujanja u cijevi vodovoda ili kanalizacije. Određuje se formulom:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2)$$

- ρ – gustoća (kg/m^3)
- v – brzina strujanja fluida (m/s)
- L – karakteristična dužina (m)
- μ - dinamička viskoznost fluida (Pa s)

Možemo ga izraziti i preko kinematičke viskoznosti:

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (3)$$

Kinematička viskoznost

Opisuje strujanje način strujanja fluida pod utjecajem zemljine gravitacije. Izražava se kao omjer dinamičke viskoznosti i gustoće, to jest omjera mase i volumena zadanog fluida.

Mjerna jedinica je metar kvadratni u sekundi ($\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$), a formula glasi:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$

Dinamička viskoznost

Ona nam prikazuje otpornost fluida na deformaciju tj. otpornost fluida na strujanje. Prema formuli ona nam govori kakva je reakcija fluida kod promjene brzine, kada jedan fluid klizi preko drugog. Izražava se:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (5)$$

- τ – naprezanje smicanja
- μ – dinamička viskoznost
- du/dy – gradijent brzine između slojeva fluida

SI jedinica dinamičke viskoznosti je Pa*s (pascal-sekunda) tj. Ns/m²

Kod niske viskoznosti dinamička viskoznost je izražena u vrlo malim količinama što znači da imaju vrlo malu otpornost na gibanje tj. Lako teku dok je kod tekućina visoke dinamičke viskoznosti sporije kretanje i takve tekućine su u velikoj veličini guste.

Reynoldsovim eksperimentom prikazujemo prijelaz između laminarnog u turbulentno strujanje tekućine. Iznimno je bitan iz razloga što nam pojašnjava čimbenike koji utječu na protok tekućine poput viskoznosti, gustoće i brzine. Eksperiment provodimo na način da postavimo aparaturu koja se sastoji od staklene cilindrične cijevi spojene na stakleni bazen kroz koji promatramo eksperiment, cjevčice s bojom i ventila za kontrolu protoka. Eksperiment započnemo na način da puštamo vodu kroz ventil vrlo malog intenziteta te puštamo boju kroz cjevčicu. Na početku primjećujemo da voda teče paralelnim slojevima koji nemaju međusobnu interakciju. Ovakvo strujanje tekućine nazivamo laminarnim. Otvaramo ventil do kraja i promatramo boju koja prolazi kroz cijev. Kako smo maksimalno povećali protok vode, dosegnuta je kritična brzina te je došlo do pojave oscilacije u cijevi a samim time i do naglog miješanja vode sa bojom kako bi na kraju dobili potpuno obojanu vodu u cijevi. Zaključili smo da je turbulentno strujanje okarakterizirano naglim kretanjem fluida tj. tekućine. Ovim eksperimentom dokazujemo kako ponašanje tekućine uvelike utječe na sasvim malu promjenu protoka kroz cijev. Njime također određujemo i Reynoldsov broj, razumijemo tranziciju iz laminarnog u turbulentno strujanje pomoću kojih možemo lakše dizajnirati, projektirati i proračunavati hidotehničke projekte i infrastrukturu.

3. VRSTE TEKUĆINA

Newtonske tekućine

Kod newtonskih tekućina viskoznost ostaje konstantna, to jest nepromjenjiva u odnosu na brzinu deformacije. One imaju linearan odnos između viskoznosti i deformacije. Primjeri newtonskih tekućina su voda, zrak, alkohol, benzin, mineralno ulje. Za newtonske tekućine vrijedi izraz tj. formula gdje su μ dinamička viskoznost a du/dy brzina deformacije (5)

Nenewtonske tekućine

U nenewtonskim tekućinama se viskoznost mijenja s obzirom na brzinu deformacije. Ponašanje ovih fluida može se definirati na četiri različita načina:

- Dilatantno, kod kojeg se viskoznost povećava s povećanjem deformacije, npr. Oobleck, živi pijesak, plastelin.
- Pseudoplastično koje se ponaša na način da se viskoznost smanjuje s obzirom na utjecaj deformacije
- Reopektičko koje je po definiciji isto kao i dilatantno međutim ovisi o vremenskom periodu deformacije. Primjera radi poznata reopektička tekućina tj. česti građevinski materijal je gips koji se u određenom vremenskom periodu steže i postaje viskozniji te u konačnici stvrdnjava, poprima čvrsti oblik
- Tiksotropno koje također kao i dilatantno s vremenom gubi viskozna svojstva međutim ovisi o vremenskom periodu. Primjer tiksotropnog materijala je asfalt.
- Nenewtonske tekućine se ne mogu jednostavnijom formulom proračunavati te ih je moguće jedino složenim modelima odrediti.

4. BERNOULLIJEVA JEDNADŽBA I JEDNADŽBA KONTINUITETA

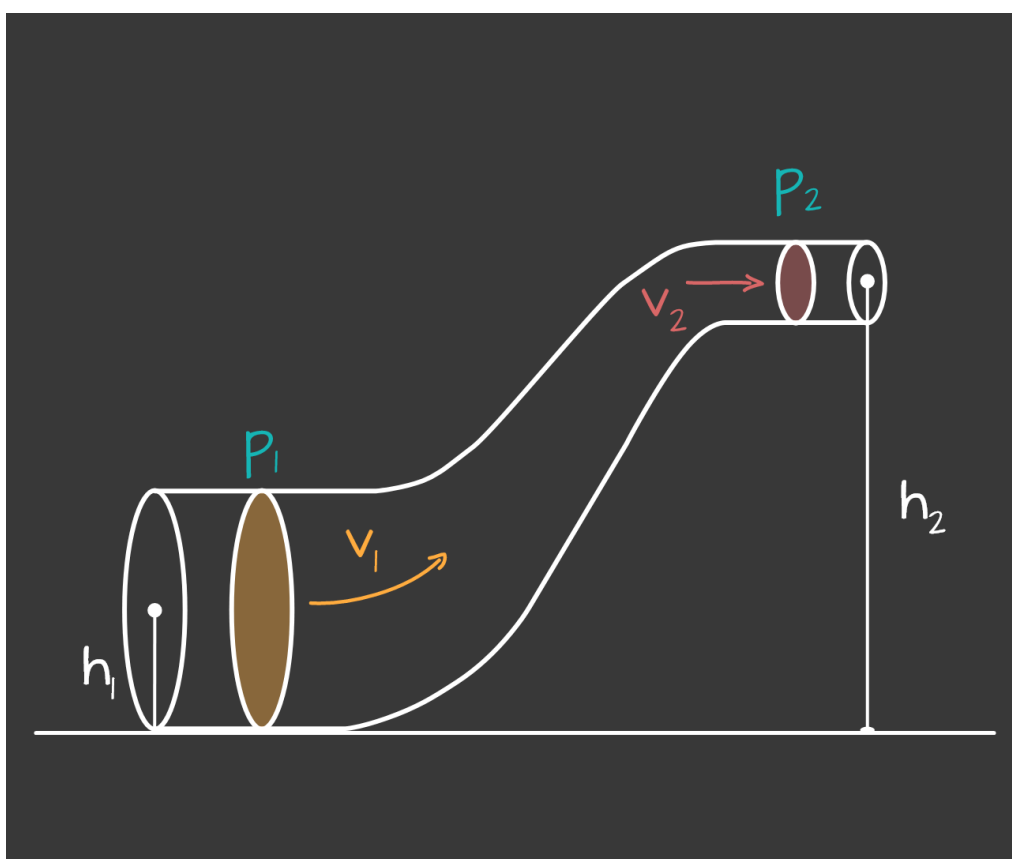
Bernoullijeva jednađba nam opisuje zakon očuvanja energije za strujanje fluida. Iz jednađbe možemo reći da idealanom fluidu (bez trenja, nestlačiv) energija fluida ostaje konstantna, krećući se kroz spremnik, cijev ili prostor. Prikazuje nam smanjenje tlaka pri povećanju

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (6)$$

p_1, p_2 – statički tlak

$\frac{1}{2}\rho v_1^2, \frac{1}{2}\rho v_2^2$ – dinamički tlak

$\rho g h_1, \rho g h_2$ – hidrostatski tlak (jednak nuli kod horizontalnih cijevi, $h_1 = h_2$)



Slika 2. – Prikaz bernoullijevog zakona

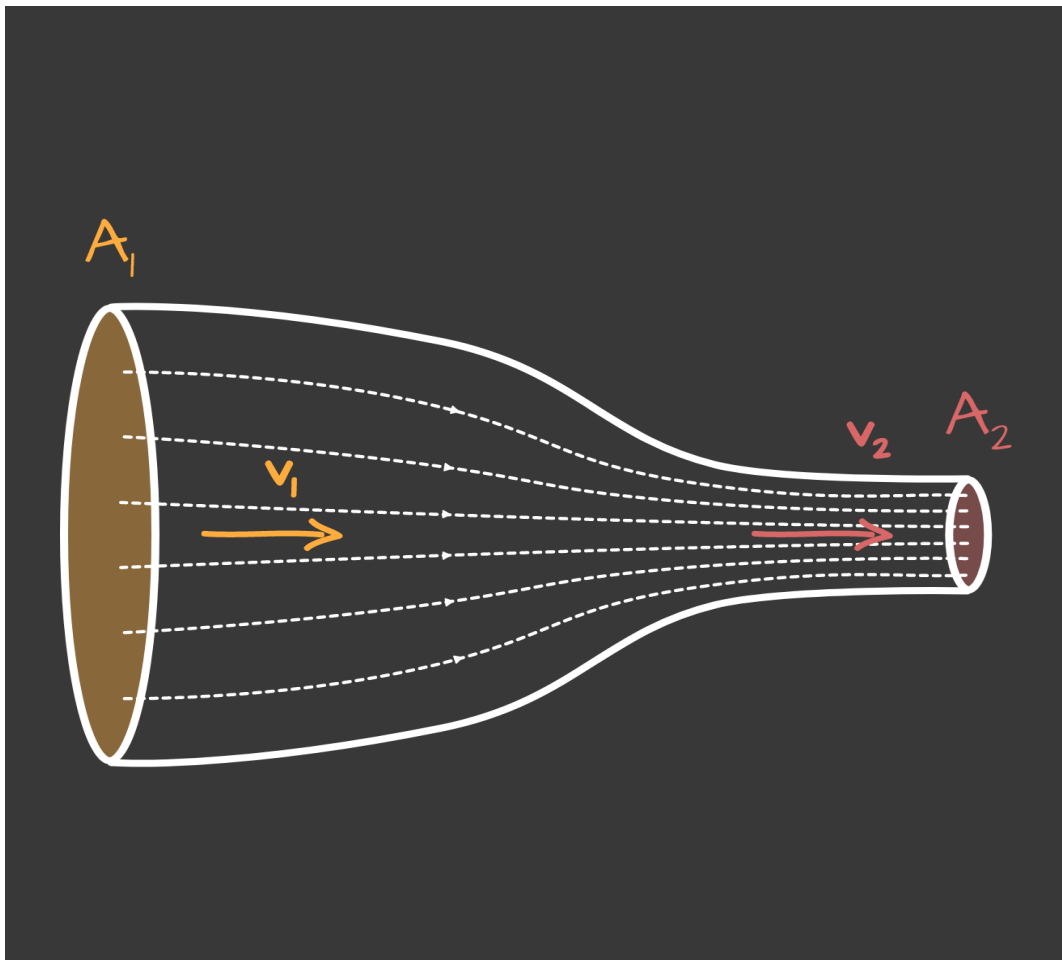
Jednadžba kontinuiteta nam govori da masa u nekom sustavu tečenja fluida mora ostati konstantna. Prikazuje nam jednakost između masa pri ulasku u sustav i izlasku iz sustava. Pomaže nam razumjeti kako se tekućine kreću kroz cijevi različitih poprečnih presjeka i kako se sukladno tome mijenjaju njihove tlak i brzina. Imamo dvije vrste jednadžbi, za stlačivi i nestlačivi fluid :

Stlačivi

Nestlačivi

$$p_1 A_1 v_1 = p_2 A_2 v_2 \quad (7) \quad (8) \quad A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Možemo primjetiti da će se kod promjene poprečnog presjeka cijevi promijeniti i vličina brzine kako bi nadoknadila promjenu površine.



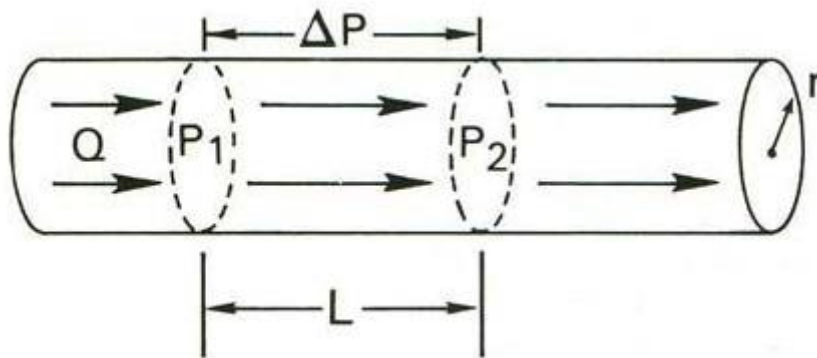
Slika 3. – Primjer suženja cijevi

5. POISEUILLE-OV ZAKON

Dio fizike koji nam govori o laminarnom protoku tj. strujanju kroz neku cijev, kod kojeg protok fluida ovisi o razlici tlaka, duljini i promjeru cijevi te najbitnije viskoznosti tekućine. Zakon je primjenjiv isključivo na Newtonske tekućine tj. na tekućine čija viskoznost ne ovisi o brzini deformacije odnosno konstantna je. Poiseuille-ov zakon je primjenjiv na mnogim primjerima kao što je npr. krvožilni sustav. Formula Poiseuille-ovog zakona za protok realnog fluida kroz cijev glasi:

$$Q = \frac{\pi * r^4 * \Delta P}{8 * \eta * L} \quad (9)$$

- Q – volumen protoka tekućine koja prođe kroz cijev u vremenskoj jedinici
- r – polumjer cijevi
- ΔP – razlika u tlaku na krajevima cijevi - $P_2 - P_1$ ($P = \rho * g * h$)
- η – viskoznost tekućine
- L – duljina cijevi



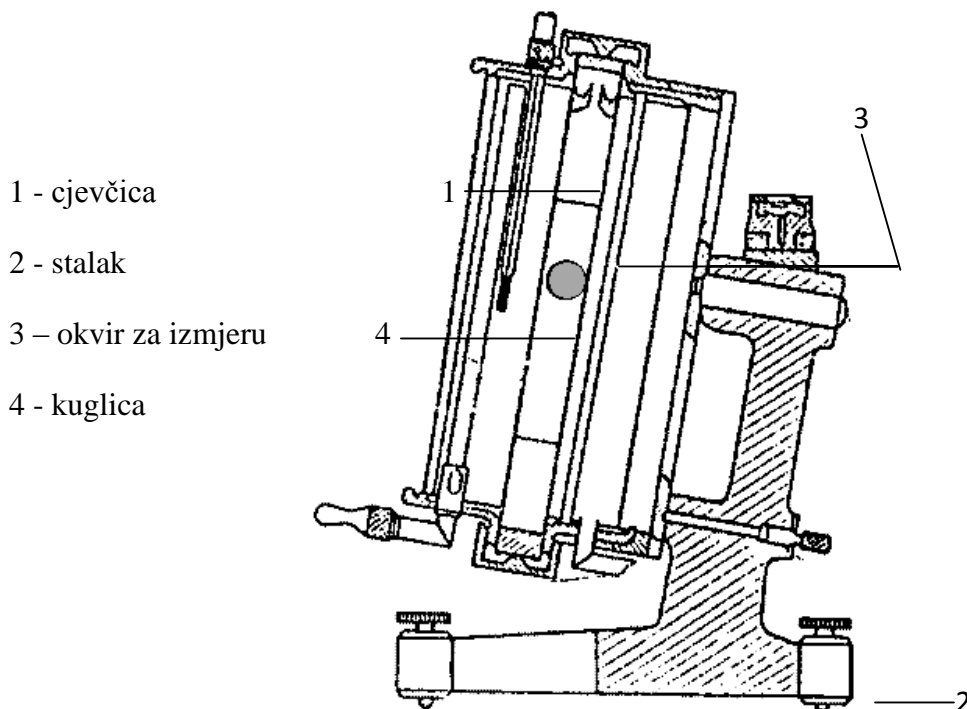
Slika 4. – Protok realnog fluida kroz cijev

Bitno je naglasiti da s povećanjem polumjera uveliko povećavamo i protok, također i uz povećanje razlike tlaka raste i protok, dok kod veće duljine cijevi protok se manjuje iz razloga što tekućina nailazi na veći otpor te uz visoku viskoznost tekućine imamo veće trenje između molekula a samim time i veći otpor tečenju. Također, ovaj zakon primjenjujemo

samo na cilindričnim cijevima tj. cijevima kružnog oblika i ne primjenjujemo ga na složenijim oblicima.

6. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE HOPPLER-OVIM VISKOZIMETROM

U eksperimentalnom dijelu cilj je odrediti dinamički koeficijent viskoznosti pomoću Hoppler-ovog viskozimetra. Hoppler-ov viskozimetar se vodi Stokes-ovim zakonom koji govori da tijelu koje prolazi kroz neku tekućinu otpor pruža ista tekućina i on ovisi o koeficijentu viskoznosti tekućine, promjeru tijela i brzini padanja, te na to tijelo djeluju Arhimedova sila, otpor tekućine (viskozna sila) i gravitacijska sila. Uređaj je napravljen na način da mjerimo vrijeme potrebno da kuglica prođe kroz viskoznu tekućinu. Sastoji se od više cjelina kao što su : staklene cjevčice ispunjene tekućinom koju ispitujemo, okomitog stakla koji pridržava cjevčice uzdignutima u određenom položaju (postoje eksperimenti gdje se cijevi montiraju pod određenim kutem kako ne bi dolazilo do nakupljanja zraka), okviri za izmjeru krajnjeg i početnog položaja kuglice i kuglica koja prolazi kroz cjevčice kako bi izmjerili viskoznost (najčešće napravljena od materijala poput čelika, stakla i metalnih legura)



Slika 5. – Hoppler-ov viskozimetar

Pokus se izvodi tako da prvo stavimo tekućinu za koju tražimo koeficijent viskoznosti i kuglicu (ukoliko je gusta tekućina koristimo lakšu kuglicu, ukoliko je rjeđa tekućina koristimo težu kuglicu) u staklenoj cjevčici iz koje moramo izbaciti zračne mjehuriće. Nakon postavljanja pokusa potrebno je odrediti temperaturu tekućine prije započinjanja pokusa na način da temperaturu izmjerimo termometrom ugrađenim u uređaj. Započinjemo eksperiment niveliranjem s vijcima na dnu kako bi kuglica ravnomjerno bila udaljena od stijenke cijevi. Postavlja se kuglica u uređaj i zatvara sa zatvaračem. Cijeli viskozimetar okrećemo naopako i promatramo pad kuglice. U isto vrijeme mjerimo štopericom vrijeme potrebno kuglici da prođe od jedne oznake do druge na cijevi, te nam to vrijeme označava osnovu za proračun viskoznosti. Uz to u tablicu još zapisujemo i temperaturu koju smo očitali. Ponavljamo mjerenje 3 puta.

Pokusom mjerimo vrijeme potrebno kuglici da padne između dvije oznake na uređaju. Udaljenost između dvije oznake (H) kuglica prođe u nekom vremenskom periodu (t) koje mjerimo štopericom. Bitno je napomenuti da se kuglica isprva giba ubrzano nakon čega konstantnom brzinom $v_0 = \frac{H}{t}$, što znači da je rezultanta sila na kuglici jednaka nuli. Sile koje djeluju su: Stokesova zbog viskoznosti gore (F_s), sila gravitacije dolje (F_g) i sila uzgona gore (F_u). S ovim članovima, dobili smo jednadžbu gibanja kuglice :

$$F_g = F_s + F_u \quad (10)$$

Kada jednadžbu rasčlanimo dolazimo do jednadžbe za računanje dinamičkog koeficijenta viskoznosti :

$$m_k * g = 6r_k\pi\eta v_0 + \rho_t V_k g \quad (11)$$

$$\rho_k V_k g = 6r_k\pi\eta \frac{H}{t} + \rho_t V_k g \quad (12)$$

$$\rho_k - \rho_t = \frac{\frac{6r_k\pi\eta H}{t}}{\frac{4r_k^3\pi g}{3}} = \frac{9\eta H}{2r_k^2 g t} \quad (13)$$

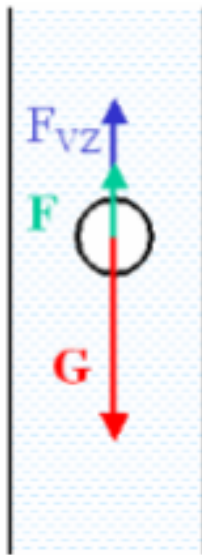
$$\eta = (\rho_k - \rho_t) * \left(\frac{2r_k^2 g}{9H}\right) * t \quad (14)$$

Iz jednadžbe, konstanta kuglice nam je $k = \frac{2r_k^2 g}{9H}$.

Prema prethodnim zaključcima jednadžba računa viskoznosti glasi:

$$\eta = (\rho_k - \rho_t) * k * t \quad (15)$$

Rezultat eksperimenta je dinamička viskoznost tekućine dobivena u mjesnoj jedinici Pascal – sekunda (Pa s). Eksperiment se koristi za tekućine primarno niske viskoznosti poput ulja, otapala, smola, tinte, boje, glicerina, želatina te mnogih drugih materijala.



Slika 6. – Poligon sila na kuglici

7. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE ENGLER-OVIM VISKOZIMETROM

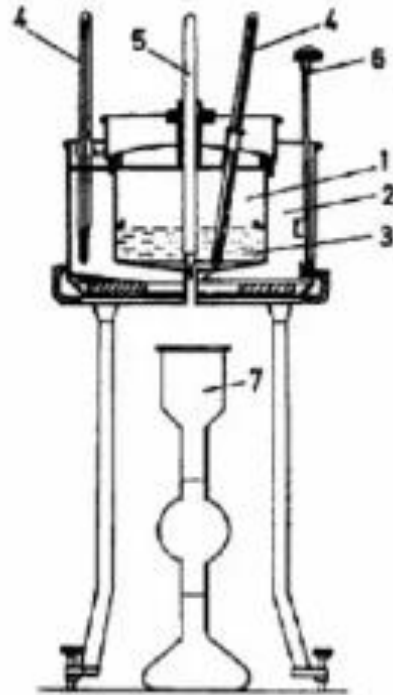
Iako primarno ima funkciju mjerenja viskoznosti ulja i naftnih derivata Engler-ov uređaj u vrlo je širokoj upotrebi u inženjerskim proračunima i praksi. Izumljen je kako bi se moglo usporediti viskoznost raznih tekućina u odnosu s viskoznosti vode na određenoj temperaturi. Uređaj nam daje relativnu usporedbu viskoznosti promatrane tekućine (uglavnom ulja) s vodom te ju mjerimo tako da pratimo vremenski period unutar kojeg tekućina istječe iz predodređenog otvora. Za rezultat dobivamo stupanj Englerov ($^{\circ}E$). U unutarnju posudu stavljamo određeni volumen (uglavnom 200 cm^3) tekućine koju ispituje koje se zagrijava do temperature na kojoj ispituje ($30, 50, 70, 100 \text{ }^{\circ}C$). Potom zatvaramo posudu i započinjemo mjerenje vremenskog perioda, štopericom, potrebnog da sva tekućine isteče iz posude. Nakon tražene tekućine isti postupak ponavljamo za destiliranu vodu koju zagrijavamo na $20 \text{ }^{\circ}C$.

Viskoznost dobijemo usporedbom vremenskih perioda kraja isticanja promatrane tekućine i vode:

$$V = \frac{t_t}{t_{v(20^{\circ}C)}} \text{ [}^{\circ}E\text{]} \quad (16)$$

Englerov viskozimetar ima veliku prednost zbog toga što ima široku primjenu kod raznih vrsta tekućina tj. nije ograničen na tekućine visoke niti isključivo tekućine niske viskoznosti, međutim može se javiti problematika kod vrlo gustih i vrlo rijetkih tekućina. Također, vrlo je jednostavne upotrebe, što bi značilo da nema nikakvih kompliciranih sadržaja i dijelova same aparature koju je potrebno na kompliciran način slagati ili kalibrirati pod određenim kutevima te se vrlo jednostavno i brzo provodi mjerenje. Međutim nemamo najpreciznije proračune tj. provode se „relativna“ mjerenja iz razloga što se viskoznost preko Englerovog uređaja referira u odnosu isključivo na vodu te je potrebno konstantno održavati temperaturu promatrane tekućine iz razloga što bi čak i sitnije promjene vrlo bitno utjecale na rezultat eksperimenta.

- 1 – unutrašnja posuda za tekućinu
- 2 – vanjska posuda za vodu
- 3 – tekućina koju ispitujemo
- 4 – termometar
- 5 – zatvarač otvora
- 6 – miješalica
- 7 – posuda u koju istječe tekućina



Slika 7. – Englerov viskozimetar

8. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE OSTWALDOVIM VISKOZIMETROM

Uređaj oblika U staklenih cijevi koristimo kada hoćemo izmjeriti viskoznost poznate tekućine. Određujemo ga na način da mjerimo tečenje tekućine kroz kapilarne cjevčice od jedne oznake do druge („od točke A do točke B“). Uređaj isprva „baždarimo“, što znači da prvo ispitamo viskoznost vode tj. poznate tekućine. Viskozimetar postavljamo u vodu koja se nalazi pod stalnom temperaturom kako bi izjednačili temperature nakon čega se ispitana tekućina usisava kroz lijevu stranu cijevi i mjerimo protok kroz oznake B i A. Ukoliko je razina tekućine, koja ima određenu gustoću ρ , na početku na h_1 , a potom na h_2 poznata nam je jednadžba tlaka:

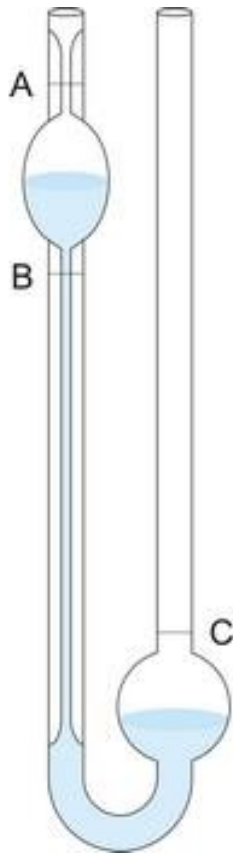
$$p = \frac{h_1 + h_2}{2} \rho g \quad (17)$$

Za apsolutna mjerenja moramo poznavati sve parametre viskozimetra (r , l , V , h_1 , h_2) ali kao što smo već naglasili „baždarimo“ uređaj tako da koristimo tekućinu poznate gustoće ρ_0 . Relativna viskoznost slijedi :

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\rho t}{\rho_0 t_0} \quad (18)$$

U jednadžbi parametri su redom: gustoća ρ , vrijeme tečenja proračunato štopericom t , gustoća poznate tekućine ρ_0 (voda). Mjerenjem dobivamo viskoznost poznate tekućine η_0 te nam preostaje proračun gustoće tekućine za koju tražimo viskoznost. U svrhe dobivanja gustoće možemo odrediti pomoću piknometra na način da izvažemo prazni piknometar m_p , puni piknometar sa referentnom tekućinom (vodom) m_{p+w} , poznate gustoće vode ρ_w te piknometar ispunjen uzorkom tekućine m_{p+s} . Prema izmjerenim parametrima dobivamo slijedeću jednadžbu pomoću koje računamo gustoću nepoznate tekućine ρ_s :

$$\rho_s = \frac{m_{p+s} - m_p}{m_{p+w} - m_p} \rho_w \quad (19)$$



Slika 8. – Ostwaldov viskozimetar

Kod Ostwaldovog viskozimetra postoje greške kod proračuna tlaka ukoliko on nije okomito postavljen čime možemo postići relativnu pogrešku u tlaku :

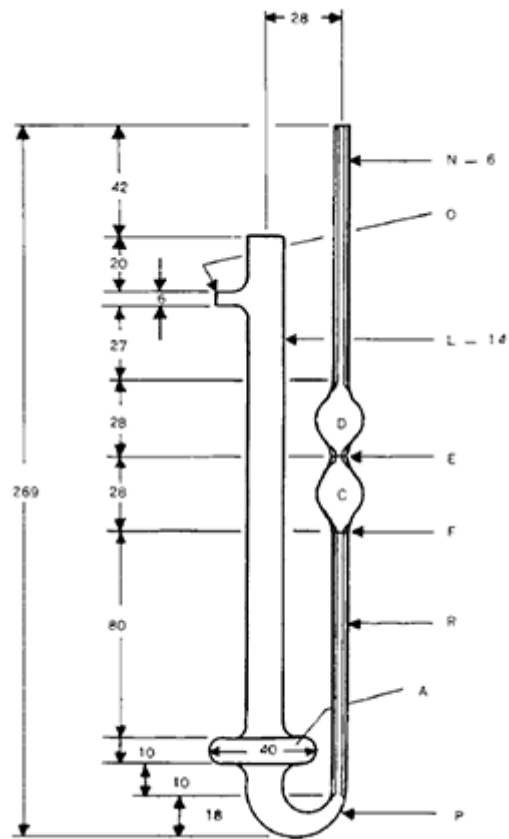
$$\Delta h_{error} = 1 - \cos\theta \pm \left(\frac{s}{h}\right) \sin\theta \quad (20)$$

Ovisno o iznosu θ koji označava odstupanje od vertikalne osi, imat ćemo isti toliki postotak pogreške tlaka ukoliko je razmak između dviju vertikalnih cjevčica $0,6h$. Također postoje pogreške uslijed nepreciznih mjerenja volumena, a pogotovo kod izvođenja eksperimenta u različitim temperaturnim uvjetima. Iz ovih razloga postoje modifikacije Ostwaldovog viskozimetra koje možemo podijeliti u dvije skupine :

1. Viskozimetri s konstantnim iznosom volumena pri temperaturi punjenja aparata
2. Viskozimetri s konstantnim volumenom pri temperaturi ispitivanja aparata

8.1.1. Pinkevitchev viskozimetar

Aparatura, modificirana po primjeru Ostwaldovog viskozimetra služi nam u odredbi kinematičke viskoznosti transparentnih Newtonskih tekućina u rasponu veličine kinematičke viskoznosti $0,6 - 17000 \text{ mm}^2/\text{s}$. Sadrže oznaku s točnim iznosom veličine koja se odnosi na različite viskoznosti.



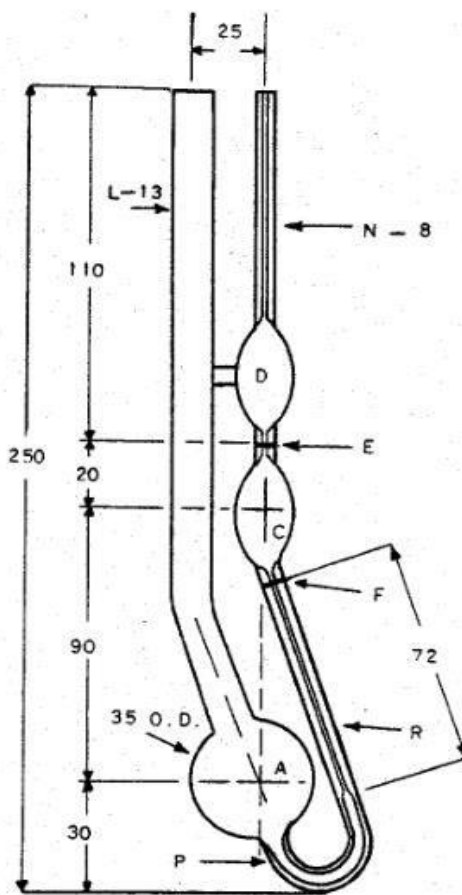
Slika 9. – Pinkevitchev viskozimetar

Vrlo bitna razlika između Pinkevitchevog i Ostwaldovog viskozimetra je razlika u konstrukciji na način da je koncentracija kod Pinkevitchevog viskozimetra usmjerena ka direktnom mjerenju kroz jednu cijevčicu kapilarnog uzdizanja. Također mjerimo vrijeme prolaska fluida unutar cjevčice kod kojeg imamo točan iznos volumena.

8.1.2. Cannon - Fenskeov rutinski viskozimetar

Veoma učestao u potrebi utvrđivanja kinematičke viskoznosti tekućina. Vodi se po principu kapilarnog viskozimetra, te kao i ostali kroštenjem gravitacije mjeri se vrijeme prolaska tekućine. Vrlo bitna karakteristika Cannon fenskeovog viskozimetra je takva da su donja i gornja posuda na istom vertikalnom pravcu u svrhu smanjenja grešaka srednjeg tlaka koje proizlaze iz odstupanja aparata od vertikalne osi pod kutem.

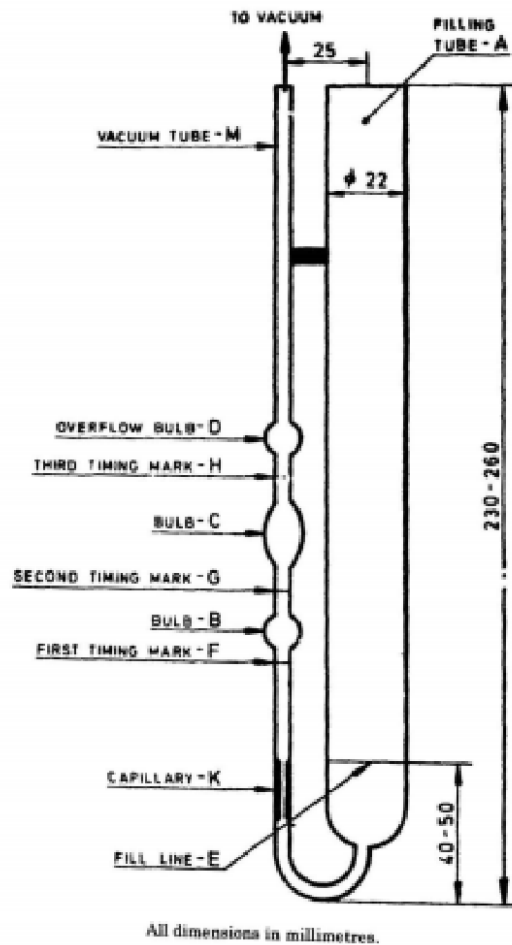
Koristi se pri određivanju tekućina s niskom i srednjom viskoznošću. Također moguće ga je upotrijebiti kod proučavanja Newtonskih tekućina iz razloga što jemu moguće mjerenje relacije naprezanja na smicanje i brzine smicanja.



Slika 10. – Cannon Fenskeov rutinski viskozimetar

8.1.3. Cannon - Manningov polumikronski viskozimetar

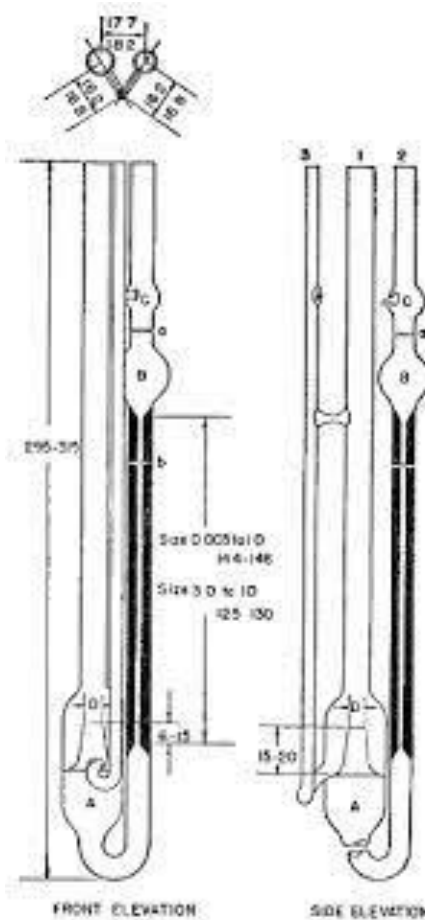
Viskozimetar vrlo visoke preciznosti koji služi mjerenju viskoznosti tekućina vrlo niske viskoznosti. Razlikuje se od ostalih na način da nam je za potrebu provođenja ekspreimanta potrebna količina tekućine u iznosu od 0,001 L. Kod provođenja eksperimenta koristimo se vakumskom metodom, na način da se vakuumom povuče tekućina iz A cijevi do oznake B.



Slika 11. – Cannon Manningov polumikronski viskozimetar

8.2.1. Sil viskozimetar

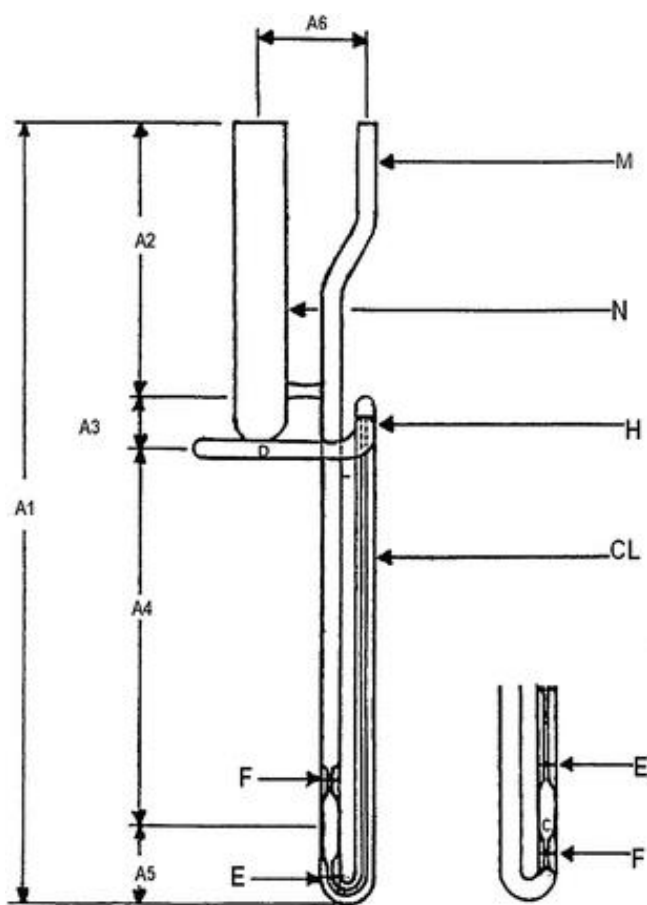
Koristimo ga u određivanju viskoznosti prozirnih Newtonskih tekućina u veličini raspona viskoznosti 0,6 – 10000 mm²/s. Kao i kod prethodno spomenutih viskozimetara odlikuju ga visoka preciznosti pri određivanju volumena te minimalizacija učinka površinske napetosti. Na instrumentu se nalaze i termometri kako bi imali mogućnost proučavanja i praćenja temperature promjene koje sami instrument može „kompenzirati“.



Slika 12. – SIL viskozimetar

8.2.2. Zeitfuchsov viskozimetar

Instrument koristimo kod tekućina, većinom Newtonskih ulja čija se veličina viskoznosti kreće u rasponu od $0,6 - 3000 \text{ mm}^2/\text{s}$, međutim tekućine moraju biti „podvrgnute“ temperaturi raspona $50 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Vrlo je lako primjenjiv i pristupan iz razloga što za razliku od ostalih instrumenata za mjerenje viskoznosti kod ovoga nije potrebno vaditi samu aparaturu van iz sklopa sa termometrom.



Slika 13. – Zeitfuchsov viskozimetar

8.2.3. bs/u - cijevni i bs/u – cijevni minijaturni viskozimetar

Koristimo instrument kada je potrebno odrediti kinematičku viskoznost tekućina poput naftnih derivata prozirnih i neprozirnih. Korištenje je kod određivanja viskoznosti u vrijednosti $0,9 - 10000 \text{ mm}^2/\text{s}$. Potrebno je pripaziti na okomitost u odnosu na vertikalnu os iz razloga što su moguća odstupanja u rezultatu mjerenja u odnosu $1^\circ = 0,2\%$ odstupanja.



Slika 14. – BS/U cijevni viskozimetar

Kod minijaturnog viskozimetra vrijednosti viskoznosti koje je moguće izmjeriti kreću se u rasponu 0,2 – 100 mm²/s. Razlika između običnog i minijaturnog je svakako veličina ali i količina uzorka koju je moguće ispitati u instrumentu.



Slika 15. – BS/U minijaturni cijevni viskozimetar

9. KORELACIJA GRAĐEVINE I VISKOZNOSTI

U građevinskim projektima i procesima često se susrećemo s različitim tekućinama u različitim ulogama. Viskoznost je bitan fizikalni parametar iz razloga što možemo lakše pristupiti problemu i projektu s inženjerskog stajališta iz razloga što tekućine čine i sudjeluju u gotovo svim građevinskim ali i inženjerskim pothvatima. Vrlo bitan primjer u građevini gdje je viskoznost bitan faktor je najbitniji građevinski materijal moderne inženjerske prakse, betona.

Viskoznost u svježoj betonskoj mješavini ima utjecaj na način da nam u principu prikazuje njegovu obradivost. Beton, sastavljen od cementa, vode i agregata zajedno čini smjesu koja mora biti dovoljno obradiv kako bi ga mogli montirati u oplatni sustav. Veliku ulogu u viskoznosti betona ima omjer sastojaka cementa i vode, međutim često imamo problem u konzistenciji pri čemu koristimo aditive u smjesama kao što su : plastifikatori i superplastifikatori.

Plastifikatorima i superplastifikatorima smanjujemo potrebu za vodom u smjesi betona. Direktno smanjuju vodocementni omjer tako da smanjuju površinsku napetost vode te omogućuju bolju disperziju čestica cementa. Uz to, uloga im je i smanjivanje mogućnosti segregacije između sastojaka mješavine. Pod segregacijom mislimo na odvajanje i

heterogeniziranje agregata i cementne paste. Kod dodavanja plastifikatora povećavamo i čvrstoću betona iz razloga što agregat i cementna pasta ima bolju povezanost s agregatom. Plastifikatori smanjuju potrebu za količinom vode u postotku od 5 do 15 % dok superplastifikatori smanjuju potrebu od 15 do 30 % te čine beton „samougladiv“ što bi značilo da smanjuje potrebu za zbijanjem betona vibracijskim uređajima. Uz velike prednosti, postoje i razni nedostaci koji najčešće ovise o kvaliteti cementa kojeg ugrađujemo u betonsku smjesu te greške u količini plastifikatora koju stavljamo u smjesu.

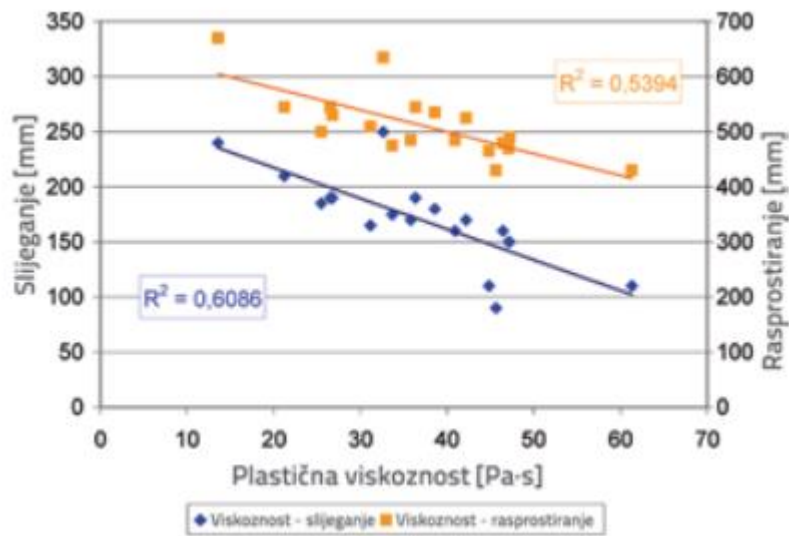
Temperatura je također čimbenik koji ima utjecaj na viskoznost betona na način da pri porastu temperature betonska mješavina gubi na viskoznosti, a pri padu viskoznost raste. Također bitno je napomenuti da nam pumpanje betona izaziva problematiku viskoznosti u svježem betonu iz razloga što smjesa mora teći jednoliko i uniformno, ukoliko ne, potrebna je veća sila za pumpanje kako ne bi došlo do stvaranja začepjenja u cijevi.

Reologija betona, znanost koja se bavi tečenju i deformacijama tvari te korelacijama deformacije, naprezanja, brzine deformacije i vremena deformacije služi nam da bismo lakše shvatili i pristupili problemu projektiranja svježeg smjese betona. Reologija svježeg betona najčešće se ne zasniva na Newtonovoj funkciji viskoznosti iz razloga što je raspored čestica u betonskoj mješavini, između morta i agregata te cementne paste i vode raspršen. Prema tome učestalije se koristi Binghamov model tj. Binghamova jednadžba :

$$\tau = \tau_0 + \mu * \dot{\gamma} \quad (21)$$

- τ - posmično naprezanje (Pa)
- τ_0 – granica tečenja (Pa)
- μ - plastična viskoznost (Pa s)
- $\dot{\gamma}$ - brzina smicanja (Pa s⁻¹)

Ispitivanja se provode na reometrima među kojima su najčešći ICAR i ConTec viskozimetri. Oba viskozimetra funkcioniraju na način da mjere torzijski moment i omogućavaju „proračun temeljnih veličina“ (τ_0 i μ). Rezultati mjerenja su dakle granica tečenja i plastična viskoznost koje prikazujemo tablično s rezultatima konzistencije



Slika 16. – Rezultat mjerenja granice tečenja i plastične viskoznosti

Asfalt je materijal koji također mora biti inženjerski projektiran na način da se ukomponira viskoznost, je jedan od glavnih građevinskih materijala koji se koristi u cestovnim konstrukcijama. Dok asfalt postavljamo bitan je utjecaj temperature na smjesu zbog toga što će pri višim temperaturama asfalt biti manje viskozan i lakše obradiv dok je kod niske temperature veća viskoznost ali manja obradivost i teže ga je montirati na kolničku konstrukciju. Međutim postoji problem kod temperaturnog utjecaja zbog deformacija koje se mogu pojaviti pri toplinskim opterećenjima. Iz tog razloga potrebno je projektirati sastav asfalta sa optimalnom viskoznosti, kako bi izbjegli habanje i termičke promjene.

10. ZAKLJUČAK

Završni rad se sastoji od 3 dijela, prvog koji opisuje strujanja tekućine i ovisnost strujanja o viskoznosti te samu teoriju viskoznosti, drugog koji opisuje vrste tekućina te jednadžbe i zakone primjenjive na tekućine, trećeg koji nam opisuje eksperimentalne dijelove ispitivanja viskoznosti od kojih su najvažniji spomenuti u detaljnijem obliku te posljednjeg, četvrtog u kojem je povezano inženjerstvo i inženjerski materijali u građevini koji su u direktnoj korelaciji s viskoznosti tekućine. Radom je na jedan jednostavniji i terminološki pristupačniji način približena tema viskoznosti u građevinarstvu.

11. LITERATURA

- [1] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Viskoznost>
- [2] <https://www.mathos.unios.hr/~mdjunic/uploads/diplomski/JER08.pdf>
- [3] Lončar, G., Andročec, V.; Mehanika tekućina . pdf
- [4] Pečornik, M.; Tehnička mehanika fluida, Školska knjiga Zagreb
- [5] Canger, J., Mjerenje viskoznosti mješavine tekućina, završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, 2019.
- [6] https://www.researchgate.net/figure/Cannon-Fenske-capillary-viscometer-tube-used-to-measure-kinematic-viscosity_fig3_339499222
- [7] https://www.researchgate.net/figure/Cannon-Manning-Vacuum-Capillary-Viscometer-Tube-Source-IS1206-1978_fig2_355191984
- [8] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-04858-1_3
- [9] <https://hrcak.srce.hr/file/144723>
- [10] Cindro, N.; Fizika 1, Školska knjiga Zagreb
- [11] <https://www.superradiatorcoils.com/blog/heat-exchanger-turbulators-types-and-purposes>
- [12] <https://gradivo.hr/pages/bernoullijeva-jednadzba>
- [13] https://www.engineersedge.com/calculators/poiseuille_law_formula_and_calculator_15643.htm
- [14] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:H%C3%B6ppler-f%C3%A9le_viskozim%C3%A9ter.gif
- [15] https://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/UNIVSS/meri_pret/seminar%202011/Merilniki%20viskoznosti%20tekocin-Topcagic_Mohorovic.pdf
- [16] <https://alfidelfi.com/CL%204%20OBJEBOOK/1all%20web%20obj%20answers%20%20only.htm>
- [17] https://www.periodni.com/gallery/preuzimanje_slike.php?name=ostwald_viscometer.png
- [18] <https://www.kaycanlab.com/product-tag/Pinkevichi+Viscometer>

12. POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz laminarnog i turbulentnog strujanja [11]

Slika 2. Prikaz Bernoullijevog zakona [12]

Slika 3. Primjer suženja cijevi [12]

Slika 4. Protok realnog fluida kroz cijev [13]

Slika 5. Hopplerov viskozimetar [14]

Slika 6. Poligon sila na kuglici [15]

Slika 7. Englerov viskozimetar [16]

Slika 8. Ostwaldov viskozimetar [17]

Slika 9. Pinkevitchev viskozimetar [18]

Slika 10. Cannon Fenskeov rutinski viskozimetar [6]

Slika 11. Cannon Manningov polumikronski viskozimetar [7]

Slika 12. SIL viskozimetar [8]

Slika 13. Zeitfuchsov viskozimetar [8]

Slika 14. BS/U cijevni viskozimetar [8]

Slika 15. BS/U minijturni cijevni viskozimetar [8]

Slika 16. Rezultat mjerenja tečenja i plastične viskoznosti [9]