

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Kekez

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Davor Ljubas, dipl. ing.

Student:

Marko Kekez

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem na velikoj pomoći mentoru izv. prof.dr.sc. Davoru Ljubasu koji mi je pružajući svoje korisne savjete i komentare uvelike pomogao u izradi ovoga rada. Također zahvaljujem laborantu Marku Skozritu u njegovoj pomoći pri izradi laboratorijskih eksperimenata i Goranu Smoljaniću, mag. ing. stroj. koji je radio na ispitivanju ulja u HEP-u i na pregledavanju teksta.

Nadalje, zahvaljujem djelatnicima Centralnog kemijskog laboratorija Hrvatske elektroprivrede d.d. kao i djelatnicima laboratorija INA Maziva d.d. - Zagreb, na analizama ulja i na uzorcima motoronog ulja koje je poslužilo za usporedne testove.

Marko Kekez



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Kekez** Mat. br.: 1191221586

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Kalibracija viskozimetara za određivanje kinematske i dinamičke viskoznosti i provjera viskoznosti različitih motornih ulja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of viscometers for determination of kinematic and dynamic viscosity and checking of viscosity for different motor oils**

Opis zadatka:

Određivanje viskoznosti mazivih tvari danas je standardni postupak koji se provodi u specijaliziranim laboratorijima. U teoriji o viskoznosti tvari razlikuju se kinematska i dinamička viskoznost. Eksperimentalno se mogu određivati i jedna i druga, na različite načine, a postoje i teorijski postupci (poznavanjem gustoće te tvari na mjerenoj temperaturi) pomoću kojih je moguće na temelju poznavanja samo jedne od viskoznosti maziva odrediti i onu drugu. Među tvarima koje se koriste za podmazivanje najčešće su u primjeni ulja za podmazivanje, mineralna ili sintetička, a među njima najveći udio pripada proizvodnji i primjeni motornih ulja. Zato će se sva ispitivanja u ovome radu odnositi na motorna ulja.

Kroz ovaj rad potrebno je:

- objasniti osnovne pojmove iz područja podmazivanja strojnih elemenata primjenom mazivih ulja (viskoznost, indeks viskoznosti, stinište, oksidacijska stabilnost i dr.),
- provesti postupke kalibracije viskozimetara za određivanje kinematske i dinamičke viskoznosti, koristeći neki od međunarodno priznatih standardiziranih postupaka, npr. prema normi ASTM D 445,
- nakon kalibracije odabrati uzorke motornih ulja različite gradacije, odrediti njihove kinematske i dinamičke viskoznosti te utvrditi eventualna odstupanja teorijskih od eksperimentalnih rezultata, odvojeno za mineralna i sintetička ulja, i objasniti ih,
- na istim uzorcima mazivih ulja načiniti usporedbu eksperimentalnih rezultata određivanja viskoznosti motornih ulja u dogovoru s akreditiranim laboratorijem za takva mjerenja u Republici Hrvatskoj.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.


Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Davor Ljubas

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	2
POPIS TABLICA	3
POPIS OZNAKA I KRATICA	4
SAŽETAK	5
1. UVOD	6
2. VISKOZNOST	7
2.1 Viskoznost mazivog ulja.....	6
2.1.1 Ovisnost viskoznosti o temperaturi	8
2.1.2 Ovisnost viskoznosti o tlaku	10
2.2 Klasifikacija motornih ulja prema viskoznosti, SAE klasifikacija.....	11
2.3 Metode određivanja viskoznosti.....	13
2.3.1 Kapilarni viskozimetar	13
2.3.2 Viskozimetar zasnovan na padanju kuglice	14
2.3.3 Rotacijski viskozimetar	16
2.4 Indeks viskoznosti	16
2.5 Stinište.....	17
2.6 Plamište i gorište	17
2.7 Oksidacijska stabilnost	18
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	18
3.1 Uređaji.....	19
3.2 Postupak kalibracije Ostwaldova viskozimetra.....	19
3.2.1 Kalibracija prvog viskozimetra	21
3.2.2 Kalibracija drugog viskozimetra	22
3.2.3 Kalibracija trećeg viskozimetra.....	23
3.3 Usporedba rezultata kinematičke viskoznosti	23
3.3.1 Usporedba s rezultatima dobivenim u HEP – ovom laboratoriju.....	23
3.3.2 Usporedba s rezultatima dobivenim u laboratoriju INA Maziva	25
3.4 Postupak kalibracije Höpplerovog viskozimetra.....	26
3.4.1 Kalibracija kuglice broj 1	27
3.4.2 Kalibracija kuglice broj 3	28
3.4.3 Kalibracija kuglice broj 4	28
3.5 Usporedba rezultata dinamičke viskoznosti FSB –a i INA	
ZAKLJUČAK.....	30
LITERATURA.....	31

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz ovisnosti smičnog naprezanja i brzine smicanja.....	8
Slika 2. Viskozno – temperaturni pravci kinematičke viskoznosti	9
Slika 3. Viskozno – temperaturni pravci dinamičke viskoznosti	10
Slika 4. Prikaz ovisnosti viskoznosti plinova i kapljevina o temperaturi.....	10
Slika 5. Ovisnost viskoznosti mineralnih ulja o tlaku	11
Slika 6. Kapilarni (Ostwaldovi) viskozimetri	14
Slika 7. Höppler-ov viskozimetar.....	15
Slika 8. Rotacijski viskozimetar.....	16
Slika 9. Uzorci ulja.....	19
Slika 10.a Referentno ulje.....	20
Slika 10.b Doziranje referentnog ulja	20
Slika 11. Podizanje razine referentnog ulja.....	20
Slika 12. Viskozimetar s referentnim uljom.....	21
Slika 13. Mjerenje uzorka INA Super 3 15W-40 na 40 °C.....	24
Slika 14. Mjerenje uzorka INA Move 5W-30 na 40 °C.....	24
Slika 15. Kalibracija kuglice broj 4.....	29

POPIS TABLICA

Tablica 1. Klasifikacija motornih ulja prema viskoznosti, SAE klasifikacija	13
Tablica 2. Kalibracija prvog viskozimetra na 20 °C	21
Tablica 3. Kalibracija prvog viskozimetra na 40 °C	22
Tablica 4. Kalibracija drugog viskozimetra na 20 °C	22
Tablica 5. Kalibracija drugog viskozimetra na 40 °C	22
Tablica 6. Kalibracija trećeg viskozimetra na 20 °C.....	23
Tablica 7. Kalibracija trećeg viskozimetra na 40 °C.....	23
Tablica 8. Rezultati mjerenja u akreditiranom laboratoriju HEP-a.....	24
Tablica 9. Usporedba rezultata laboratorijskih mjerenja FSB –a i HEP -a.....	24
Tablica 10. Odstupanje rezultata između mjerenja FSB-a i HEP-a	25
Tablica 11. Rezultati mjerenja u akreditiranom laboratoriju INA Maziva	25
Tablica 12. Usporedba rezultata laboratorijskih mjerenja FSB – a i INA Maziva	25
Tablica 13. Odstupanja rezultata između mjerenja FSB-a i INA Maziva.....	25
Tablica 14. Vrste i svojstva kuglica Höppler-ovog viskozimetra	26
Tablica 15. Kalibracija kuglice broj 1 na temperaturama 20 °C	27
Tablica 16. Kalibracija kuglice broj 3 na temperaturama 20 °C, 25 °C i 40 °C.....	28
Tablica 17. Kalibracija kuglice broj 4 na temperaturama 20 °C i 40 °C.....	28
Tablica 18. Rezultati mjerenja u akreditiranom laboratoriju INA Maziva	29
Tablica 19. Usporedba rezultata laboratorijskih mjerenja FSB – a i INA Maziva	29
Tablica 20. Odstupanja rezultata između mjerenja FSB-a i INA Maziva.....	29

POPIS OZNAKA I KRATICA

ASTM - American Society for Testing & Materials

DIN - Deutsches Institut für Normung

SAE - Society of automotive engineers

CCS - Cold Cranking Simulator

INA - Industrija nafte

HEP - Hrvatska elektroprivreda

ISO - International organization for standardization

FSB - Fakultet strojarstva i brodogradnje

SAŽETAK

U ovom radu je opisan postupak kalibracije viskozimetra za određivanje kinematičke i dinamičke viskoznosti i provjere viskoznosti različitih motornih ulja. U današnjem vremenu na tržištu postoji mnogo ulja različitih kvaliteta i viskoznost kao jedna od najvažnijih svojstava mazivih ulja je važna pri izboru motornog ulja da bi se osigurao što je moguće duži vijek trajanja motora. Kroz rad su također objašnjeni osnovni pojmovi iz područja podmazivanja strojnih elemenata koristeći maziva ulja (viskoznost, indeks viskoznosti, stinište, oksidacijska stabilnost). Ispitivanja su provedena prema normi za mjerenje kinematičke viskoznosti ASTM D 445 i prema normi DIN 53015. U laboratorijskim ispitivanjima korišteno je šest različitih tipova motornih ulja prema SAE gradaciji koja se mogu nabaviti na hrvatskom tržištu: INA Super 3 15W-40, INA Delta 5 15W-40, INA Super 2000 10W-40, INA Super 3 40, INA Ultrastar FE 5W-30, INA Move 5W-30 te jedno kalibracijsko ulje. Radi provjere kvalitete ispitivanja i same kalibracije, izvršene su usporedbe dobivenih rezultata ispitivanja ulja s rezultatima ispitivanja istih ulja u akreditiranim laboratorijima za takva mjerenja u Republici Hrvatskoj i razlike u mjerenjima uglavnom su bile unutar intervala od $\pm 8\%$.

1. UVOD

Početni izbor mazivih ulja za određene primjene obično se izvodi određivanjem fizikalnih i kemijskih svojstava preporučenog mazivog ulja. U svim današnjim strojevima i motorima sa unutrašnjim izgaranjem prisutni su razni mehanizmi koji omogućuju siguran i pravilan rad motora. Razvoj tehnologije i sve veće usavršavanje motora koji trebaju podnositi sve veća opterećenja i sve teže radne uvjete sa sobom donosi sve veći niz zahtjeva koji bi morali biti ispunjeni da bi se taj pravilan rad održao. Jedan od tih zahtjeva predstavlja trenje između različitih strojnih dijelova, koje je u ovom slučaju štetno, jer dolazi do trošenja površina koje su u međusobnom kontaktu i gibaju se, te se ujedno javlja potreba za većom uloženom energijom koja je potrebna za održavanje rada. Prema tome se upotrebljavaju različite vrste maziva kao jedna od vrsta Newtonskih fluida koja će trenje smanjiti na minimalnu veličinu. To se postiže formiranjem određenog uljnog sloja između dvije metalne površine pri čemu viskoznost ulja koja se podrazumijeva kao mjera unutrašnjeg trenja fluida ima ključnu ulogu. Viskoznost se mjeri pomoću Höpplerovog i Ostwaldovog viskozimetra poznatog i kao viskozimetar s U-cijevi.

Cilj ovog završnog rada je ispravna kalibracija Höpplerovog i Ostwaldovog viskozimetra prema točno odabranim normama te nakon obavljenih mjerenja prikazati usporedbu sa drugim vrstama ulja različitih proizvođača čije su viskoznosti pri zadanim temperaturama poznate.

2. VISKOZNOST

2.1 Viskoznost mazivog ulja

Jedno od najvažnijih svojstava svakog fluida je viskoznost. Ona predstavlja mjeru unutrašnjeg trenja koja se javlja kao otpor na promjenu položaja molekula pri strujanju fluida kada na njih djeluje smično naprezanje. Motorno ulje je u radu stalno izloženo velikim smičnim naprezanjima, visokim temperaturama i nečistoćama (produkti izgaranja). To je danas pogotovo izraženo jer se u razvoju automobila i motora teži povećanju snage i specifičnog opterećenja uz što manji ukupni volumen i težinu motora. Veličina unutrašnjeg trenja je u idealnom slučaju ovisna jedino o pritisku p i temperaturi T . U tom je slučaju uspostavljena brzina smicanja kapljevine $\frac{du}{dy}$ koja je proporcionalna smičnom napreznju τ . Iz te dvije veličine možemo definirati dinamičku viskoznost η pri konstantnom tlaku i temperaturi [1] :

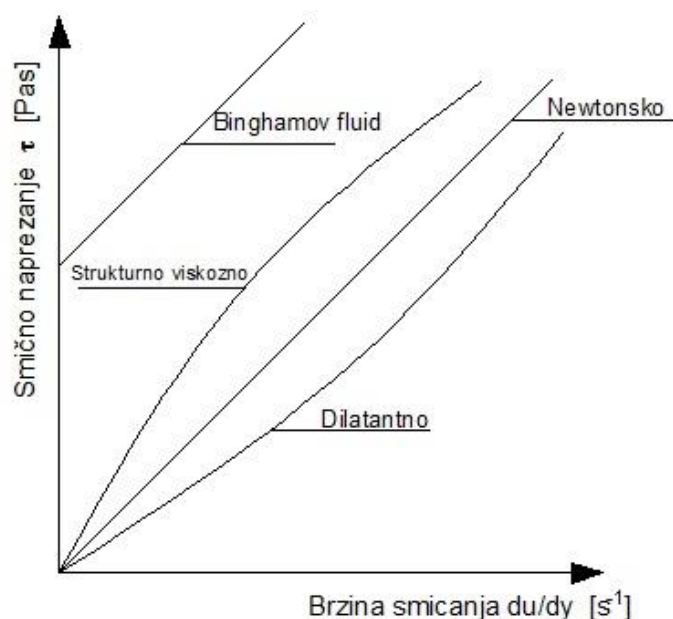
$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{du}{dy} \quad [\text{Pa}] \quad (2.1)$$

pri čemu je: η - dinamička viskoznost, Pas

τ - smično naprezanje, Pa

$\frac{du}{dy}$ - brzina smicanja, s^{-1}

Svi fluidi koji se ponašaju prema ovome zakonu nazivaju se newtonski fluidi. Newtonski fluid zadržava konstantnu viskoznost u svakom sloju smicanja, te nastavlja tok bez obzira na sile koje djeluju na njega. Postoje fluidi koji se ne ponašaju po Newtonovom zakonu trenja, pošto njihova viskoznost ovisi o brzini smicanja $\frac{du}{dy}$, to jest smičnom napreznju τ i nazivaju se ne-newtonski fluidi. Kod ne-newtonskog fluida viskoznost ovisi osim o temperaturi T i tlaku p još i o brzini smicanja. Kod ne-newtonskog fluida miješanje može stvoriti prazninu ili uzrokovati stanjivanje fluida. Takva svojstva imaju kapljevine poput majoneze ili pudinga. Kod ne-newtonskih fluida viskoznost se mijenja ovisno o primjenjenoj sili te je nije moguće precizno definirati, time takvi fluidi ne zadovoljavaju gore navedenu jednadžbu.



Slika 1. Prikaz ovisnosti smičnog naprezanja i brzine smicanja [2]

Linearna ovisnost između τ i $\frac{du}{dy}$ osim kod newtonskih fluida, također postoji još i kod drugih fluida kada se savlada minimalno smično naprezanje i postigne ustaljenost tečenja kod takozvanih Binghamovih fluida. Njima pripadaju mazive masti. Ako brzina smicanja raste eksponencijalno s temperaturom, tada se radi o padu viskoznosti s porastom smičnog naprezanja. Takvi fluidi se u užem smislu označavaju kao strukturno viskozni fluidi. Suprotno ponašanje, tj. očvršćivanje s porastom smičnog naprezanja, označava se kao dilatantni fluidi.

2.1.1 Ovisnost viskoznosti o temperaturi

Viskoznost mazivih ulja opada s porastom temperature brzo i po određenoj zakonitosti. Viskozno - temperaturnim ponašanjima je potrebno posvetiti posebnu pažnju, prije svega kod mazivih ulja (naročito motorna i ulja za zupčaničke prenosnike) koja svoju funkciju moraju ispunjavati u vrlo širokom temperaturnom području.

Manje promjene viskoznosti s povišenjem temperature određuju kvalitetu ulja. Dodavanje određenih aditiva (poboljšivača indeksa viskoznosti) ili sintetskih komponenti, doprinijelo je da viskozno-temperaturna ponašanja nekog mazivog ulja postanu što prihvatljivija. Da bi se omogućilo grafičko izračunavanje viskoznosti kod drugih temperatura, nego što je temperatura mjerenja, moraju se viskozno-temperaturna ponašanja opisati nekom formulom koja omogućava njegovo linearno predstavljanje. Često se za to koristi približna jednačina Walthera i Ubbelohdea [2]:

$$\lg \lg(\nu + c) = K - m \lg T \quad (2.2)$$

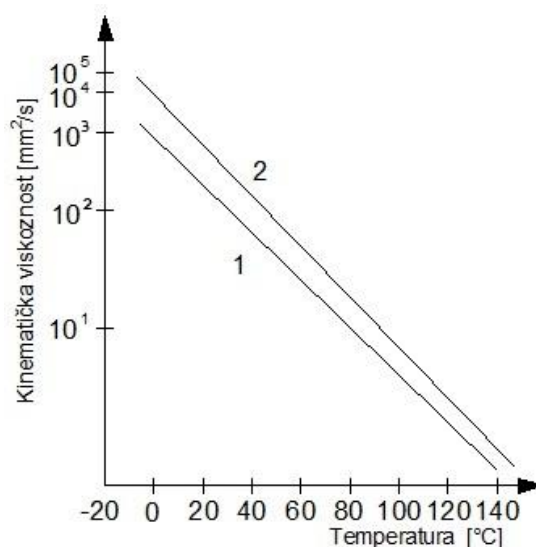
pri čemu je: ν - kinematička viskoznost, mm^2/s

T - temperatura, K

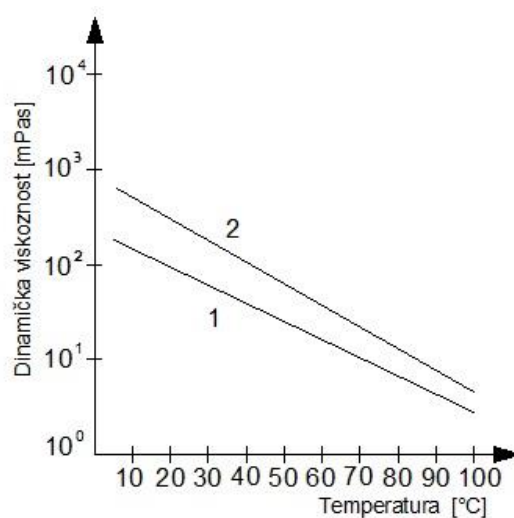
m - koeficijent nagiba pravca

c - konstanta (za mineralna ulja 0,6 - 0,9, po DIN-u 53017 iznosi 0,8)

Krivulje viskoznosti u logaritamskom mjerilu su približno pravocrtne linije. Time se viskozno-temperaturno ponašanje nekog ulja obuhvaća određivanjem viskoznosti kod dvije temperature. Odnos viskoznosti i gustoće, dakle kinematička viskoznost, nanosi se za dvije temperature, čime se dobiva pravac koji služi kao karakteristika viskozno-temperaturnog ponašanja. Ovo linearno prikazivanje je pouzdano jedino za temperature između 20 °C i 100 °C. Na osnovu Walther-Ubbelohdeove jednadžbe napravljeni su svi ASTM dijagrami za izračunavanje ovisnosti kinematičke viskoznosti o temperaturi, koji se danas široko primjenjuju. Istina je da oni opisuju ponašanje mazivih ulja (posebno motornih i ulja za zupčaničke prijenosnike) tako dobro da se na osnovu dvije egzaktne izmjerene vrijednosti kinematičke viskoznosti mogu interpolirati s velikom točnošću u širokim temperaturnim granicama.

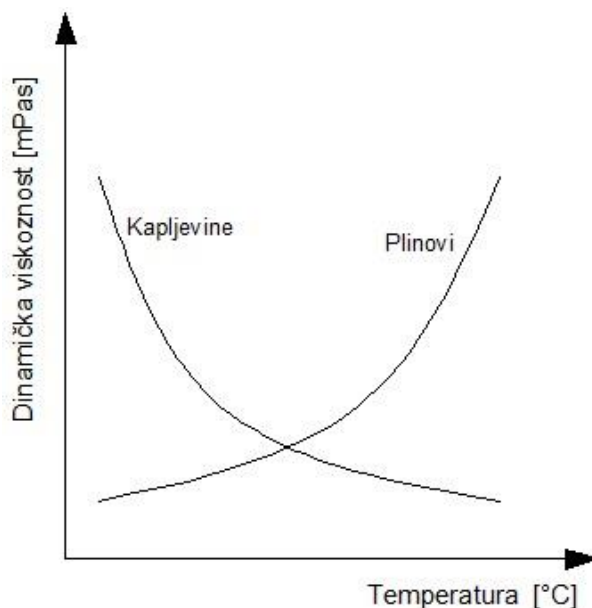


Slika 2. Viskozno – temperaturni pravci kinematičke viskoznosti (1- parafinsko ulje, 2 – naftensko ulje) [2]



Slika 3. Viskozno – temperaturni pravci dinamičke viskoznosti (1- parafinsko ulje, 2 – naftensko ulje) [2]

Pri normalnom tlaku zraka viskoznost plinova za razliku od kapljevina raste s porastom temperature.



Slika 4. Prikaz ovisnosti viskoznosti plinova i kapljevina o temperaturi [3]

Uzrok tome je što je kod kapljevina dominantna sila kohezije, odnosno međumolekularna sila koja opada s porastom temperature pa samim time opada i viskoznost. Nasuprot tome kod plinova je dominantna difuzija molekula među slojevima. Difuzija uzrokuje izmjenu impulsa i time izjednačava brzine susjednih slojeva, što je ekvivalentno sili trenja među slojevima,

odnosno javlja se viskoznost. Utjecaj difuzije u plinovima puno je manji od utjecaja međumolekularnih sila u kapljevinama tako da u odnosu na njih plinovi pokazuju znatno manju viskoznost. Manji iznos viskoznosti znači manji otpor mazivog ulja što sa sobom povlači manje gubitke snage motora. S druge pak strane, veći iznos viskoznosti bolje štiti motor i njegove pokretne dijelove od trošenja.

2.1.2 Ovisnost viskoznosti o tlaku

Povećanje tlaka povećava gustoću molekula fluida, a time i njegovu viskoznost. Zbog male kompresibilnosti kapljevine za veće povećanje viskoznosti je potreban veliki tlak. Ovisnost viskoznosti o tlaku može se izraziti jednadžbom [2]:

$$\eta_p = \eta_0 \cdot e^{\alpha p}, \quad [\text{mPas}] \quad (2.3)$$

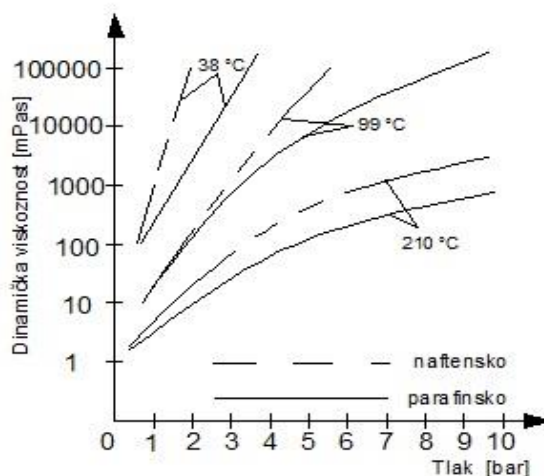
pri čemu je: η_p - viskoznost kod željenog tlaka p , mPas

η_0 - viskoznost kod atmosferskog tlaka, mPas

α – koeficijent ovisnosti viskoznosti o tlaku

$$\alpha = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{d\eta}{dp} \quad (2.4)$$

Određivanje ovisnosti viskoznosti o tlaku nije sasvim jednostavno, budući da α ovisi o strukturi ispitivane kapljevine. Naročite poteškoće u pogledu izračunavanja α postoje kod mineralnih ulja čija molekulska struktura općenito nije poznata, pošto se radi o smjesi mnogobrojnih ugljikovodika. Porastom temperature smanjuje se ovisnost viskoznosti o tlaku, a porastom sadržaja aromata i naftena povećava.



Slika 5. Ovisnost viskoznosti mineralnih ulja o tlaku [2]

Postoji više vrsta viskoznosti i to: dinamička, kinematička i volumenska viskoznost. Dinamička viskoznost je koeficijent unutrašnjeg trenja čestica fluida i izražava se u Pas. Kinematička predstavlja odnos dinamičke viskoznosti i specifične gustoće fluida, a izražava se u m^2/s . Volumenska viskoznost (često nazvana druga viskoznost) je važna za efekte gdje je bitna stlačivost kapljevine. Primjer su udarni valovi i širenje zvukova. Volumenska viskoznost jednoatomnih plinova jednaka je nuli, a u strujanjima gdje je brzina promjene volumena čestica fluida (odnosno gustoće fluida) mala, koeficijent volumenske viskoznosti se može zanemariti.

2.2 Klasifikacija motornih ulja prema viskoznosti, SAE klasifikacija

SAE-klasifikacija motornih ulja prema viskoznosti predstavlja najrašireniji sustav klasifikacije maziva u automobilskoj industriji i prometu. Godine 1926. Američko udruženje inženjera koje se bavilo razvojem automobilske industrije SAE (Society of Automotive Engineers) podijelilo je ulja po viskoznosti u dvije osnovne skupine:

- monogradna – sezonska, moraju se mijenjati prema godišnjim dobima - zima/ljeto
- multigradna – koriste se tijekom cijele godine

Zimska ulja s oznakom W – propisana je maksimalna viskoznost kod niskih temperatura i minimalna viskoznost kod 100 °C.

Ljetna ulja – propisana je minimalna i maksimalna viskoznost kod 100 °C

Multigradna ulja – ulja čija viskoznost kod niskih temperatura udovoljava propisima za zimska ulja, a kod 100 °C zahtjevima za ljetna. Multigradna ulja koriste se u podnebljima gdje su karakteristike klime takve da je neophodna upotreba zimskih i ljetnih ulja.

Prema navedenoj kvalifikaciji definiraju se dvije kategorije viskoznosti motornih ulja:

1. gradacije označene slovom W definirane su:

- maksimalnom dinamičkom viskoznosti na niskim temperaturama. Viskoznost se određuje prema proceduri ASTM D 2602 pri određenoj temperaturi test metodom za prividnu viskoznost motornih ulja na niskim temperaturama, koristeći uređaj Cold Cranking Simulator (CCS)
- najvećom graničnom temperaturom pumpabilnosti (ASTM D 3829) koja govori o sposobnosti dobavljanja ulja do uljne pumpe i uspostavljanju odgovarajućeg tlaka motornog ulja u početnoj fazi rada motora, tj. u

hladnom startu motora pri niskim temperaturama kad treba zadovoljiti zahtjeve za viskoznošću

- minimalnom kinematičkom viskoznosti u mm^2/s na $100\text{ }^\circ\text{C}$ koja se mjeri prema ASTM D 445

2. gradacije koje ne sadrže slovo W definirane su određivanjem kinematičke viskoznosti u mm^2/s na $100\text{ }^\circ\text{C}$ koja se određuje prema normi ASTM D 445. Kako je svaka W gradacija definirana maksimalnom dinamičkom viskoznosti pri niskim temperaturama i najvećom graničnom temperaturom pumpabilnosti, postoji mogućnost da neko ulje zadovolji zahtjevima više od jedne W gradacije, pa se onda označava najnižom gradacijom. Isto tako, ulje može odgovarati i gradaciji bez slova W, npr. SAE 40, te je takvo ulje multigradno s oznakom npr. 5W-40.

Tablica 1. Klasifikacija motornih ulja prema viskoznosti, SAE klasifikacija [4]

SAE viskozna grupa	Viskoznost na niskim temperaturama		Viskoznost na visokim temperaturama		Granična temperatura pumpabilnosti ASTM D 3829 $^\circ\text{C}$ max.
	mPas najviše	na. $^\circ\text{C}$	100 $^\circ\text{C}$ ASTM D 445 mm^2/s		
			min.	max.	
0W	6200	-35	3,8	-	-40
5W	6600	-30	3,8	-	-35
10W	7000	-25	4,1	-	-30
15W	7000	-20	5,6	-	-25
20W	9500	-15	5,6	-	-20
25W	13000	-10	9,3	-	-15
20	-	-	5,6	9,3	-
30	-	-	9,3	12,5	-
40	-	-	12,5	16,3	-
50	-	-	16,3	21,9	-
60	-	-	21,9	26,1	-

2.3 Metode određivanja viskoznosti

Za mjerenje viskoznosti koriste se uređaji viskozimetri. Ovisno o tome je li fluid newtonski ili ne-newtonski postoje različiti viskozimetri:

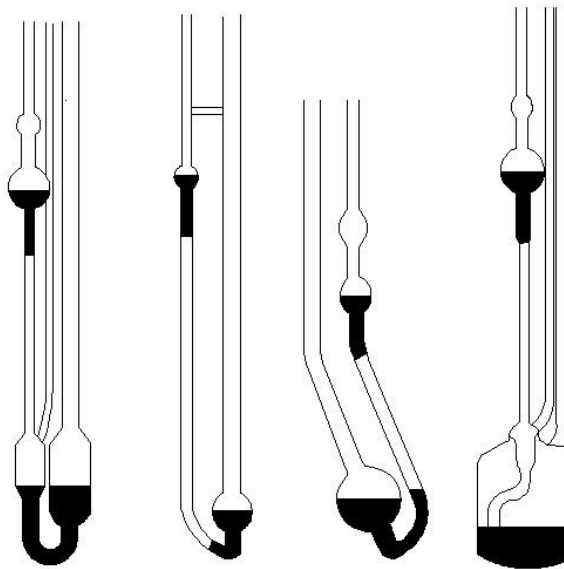
1. viskozimetri za ispitivanje newtonskih tekućina:
 - a) kapilarni viskozimetar
 - b) viskozimetar zasnovan na padanju kuglice
 - c) rotacijski viskozimetar

2. viskozimetri za ispitivanje ne-newtonskih fluida:

- a) rotacijski viskozimetar
- b) viskozimetar sa kupom i pločom

2.3.1 Kapilarni viskozimetar

Viskoznost newtonskih fluida određuje se mjerenjem vremena koje je potrebno da ispitivana količina protekne kroz kapilaru između dvije oznake pri određenoj temperaturi pod utjecajem gravitacijske sile. Kapilarni viskozimetar se još najčešće naziva Ostwaldov viskozimetar.



Slika 6. Kapilarni (Ostwaldovi) viskozimetri [5]

Vrijeme protjecanja kroz kapilaru između dvije oznake ne smije biti kraće od 200 s da bi mjerenje bilo valjano. Kinematička viskoznost se izračunava na način da se vrijeme protjecanja t izraženo u sekundama pomnoži s konstantom kapilare C pa je prema [6]:

$$\nu = C \cdot t \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (2.5)$$

ν - kinematička viskoznost, m^2/s

t - vrijeme protjecanja, s

Dinamička viskoznost se dobiva kao umnožak dobivene kinematičke viskoznosti i gustoće ispitivanog fluida pri istoj temperaturi kojoj je mjerena kinematička viskoznost pa je prema [6]:

$$\eta = \rho \cdot \nu, [\text{Pas}], \quad (2.6)$$

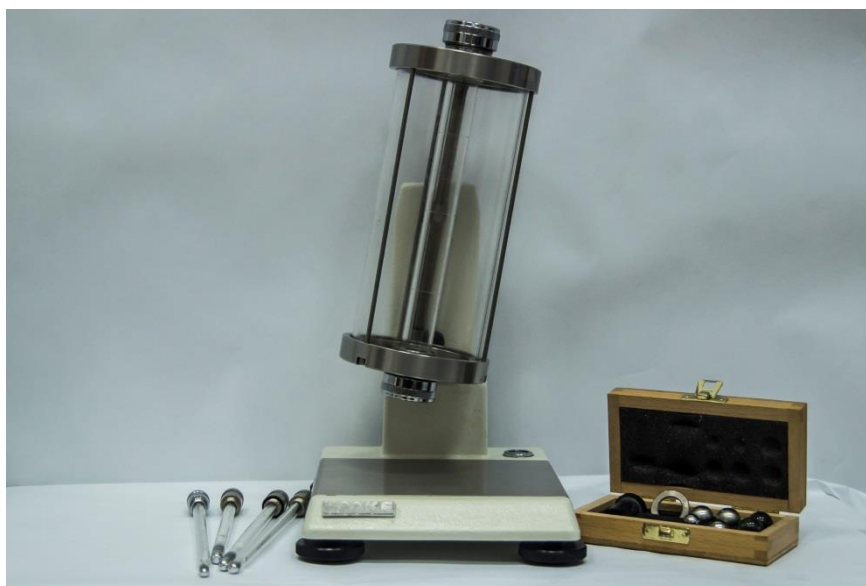
ρ - gustoća , g/cm³

ν - kinematička viskoznost , cSt

Raspon kinematičkog koeficijenta s obzirom na odabrani tip viskozimetra i proizvođača kreće se od 0.2 – 300000 cSt.

2.3.2 Viskozimetar zasnovan na padanju kuglice

Princip ovog viskozimetra zasnovan je na padanju staklene ili čelične kuglice kroz skoro vertikalno postavljenu staklenu cijev koja je ispunjena uzorkom na konstantnoj temperaturi. Kugla je poznate gustoće i promjera, a brzina kojom ona pada je obrnuto proporcionalna viskoznosti uzorka. Ovaj viskozimetar se još naziva Höppler-ov viskozimetar.



Slika 7. Höppler-ov viskozimetar

Izračunavanje dinamičke viskoznosti slijedi iz Stokesovog zakona [7]:

$$F_d = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot v \quad [\text{N}] \quad (2.7)$$

F_d – sila trenja, N

η - koeficijent viskoznosti, Pas

R – radijus sferičnog predmeta, m

v – brzina padanja kuglice, m/s

Kuglica pada pod utjecajem gravitacijske sile:

$$F_1 = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot (\rho_k - \rho_f) \cdot g \quad [\text{N}] \quad (2.8)$$

Izjednačavanjem (2.4) i (2.5) slijedi izraz za koeficijent viskoznosti:

$$\eta = \frac{\frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot (\rho_k - \rho_t) \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{s}{t}} = \frac{\frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot R \cdot s} \cdot (\rho_k - \rho_t) \cdot t = K \cdot (\rho_k - \rho_t) \cdot t, \quad [\text{Pas}] \quad (2.9)$$

η - koeficijent viskoznosti, Pas

K - konstanta kuglice, $\text{mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^3 / \text{g} \cdot \text{s}$

t – vrijeme padanja kuglice, s

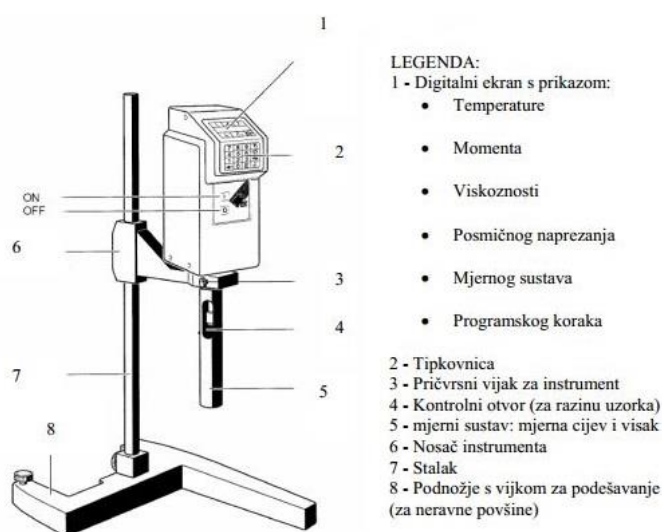
ρ_k - gustoća kuglice, g/cm^3

ρ_t - gustoća uzorka, g/cm^3

Kuglice koje se koriste mogu biti različite gustoće i promjera, a raspon koeficijenta viskoznosti se kreće od 0,05 – 20 Pas. Vrijeme padanja kuglice propisano je prema [8].

2.3.3 Rotacijski viskozimetar

Rotacijski viskozimetar služi za određivanje dinamičkog viskoziteta η . Moguće je mjeriti apsolutni viskozitet uz standardna rotirajuća tijela, kao i relativni viskozitet koji se često koristi za komparativna mjerenja kvalitete u procesima proizvodnje. Princip mjerenja zasniva se na momentu koji je potreban da se zadrži konstantna brzina vrtnje cilindričnog viska koji je uronjen u ispitni uzorak pri konstantnoj temperaturi pri čemu se mjeri relativna otpornost na rotaciju. Izmjereni moment i izmjerena brzina se koriste za određivanje viskoznosti η [Pas]. Za podešavanje i održavanje temperature koristi se temperaturna kupka s vodom u koju je uronjen grijač, i koja okružuje i prenosi temperaturu na ispitivani uzorak.



Slika 8. Rotacijski viskozimetar [4]

2.4 Indeks viskoznosti

Promjena viskoznosti s promjenom temperature označuje se indeksom viskoznosti (ulja većeg indeksa viskoznosti pokazuju manju promjenu viskoznosti s promjenom temperature). Mineralna ulja imaju indeks viskoznosti do približno 100, dok se dodatkom aditiva može postići i znatno viši (do 200). Sintetska ulja mogu imati indeks viskoznosti i veći od 200. Sustav njegovog određivanja se temelji na dva niza standardnih mazivih ulja različitih viskoziteta [4]:

L - ("low") - ulja s $IV = 0$, pokazuju izrazito veliku ovisnost viskoziteta o temperaturi (pretežno naftensko-aromatska struktura);

H - ("high") - ulja s $IV = 100$, pokazuju malu ovisnost viskoziteta o temperaturi (pretežno parafinska struktura).

$$i.v = \frac{L-U}{L-H} \cdot 100 \quad (2.10)$$

U – izmjerena kinematička viskoznost ulja na 40 °C čiju vrijednost indeksa viskoznosti trebamo izračunati

L – kinematička viskoznost ulja na 40 °C, kojemu je indeks viskoznosti jednak nuli, a koji pri 100 °C ima istu viskoznost kao i ulje kojem se indeks viskoznosti želi izračunati

H – kinematička viskoznost ulja pri 40°C, kojemu je indeks viskoznosti 100, a koji pri 100 °C ima istu viskoznost kao i ulje kojem se indeks viskoznosti želi izračunati

Ulja s visokim indeksom viskoznosti primjenjuju se kod avionskih motora i automobila koji rade pri vrlo niskim temperaturama, ili kod instrumenata koji su podvrgnuti vrlo velikim promjenama temperature.

2.5 Stinište

Vrlo važno niskotemperaturno svojstvo maziva je stinište ili temperatura na kojoj mazivo prestane teći, a koja također ovisi o kemijskom sastavu i strukturi ulja. Stinište mazivih ulja određeno je primjenom normirane ispitne metode ASTM D 97 za određivanje stiništa naftnih proizvoda. Nakon početnog zagrijavanja, uzorak se hladi prema utvrđenom režimu hlađenja, te se tecivost uzorka provjerava svaka 3 °C. Najniža temperatura na kojoj uzorak više ne teče bilježi se kao stinište (engl. *pour point*).

2.6 Plamište i gorište

Plamište mazivog ulja je najniža temperatura na kojoj se pod utvrđenim uvjetima ispitivanja događa prvo zapaljenje smjese uljnih para sa zrakom, a da pritom ne slijedi daljnje gorenje. Daljnim zagrijavanjem ulja i stvaranjem dovoljne količine pare koja će podržati gorenje dulje od 5 s znači da je postignuta temperatura gorišta, koja je za motorna ulja obično 20 – 30 °C viša od plamišta. Postoje dvije osnovne metode:

- po Marcussonu - otvoren lončić, za ulja s plamištem iznad 100 °C ;
- po Pensky-Martensu - zatvoren lončić za motorna i loživa ulja s plamištem ispod 100 °C.

Plamište i gorište su kontrolne veličine važne za korisnike iz sigurnosnih razloga i te se temperature smanjuju ukoliko se ulje pomiješa s gorivom u određenoj količini (~10% masenog udjela benzina) čak i do područja radne temperature motora.

2.7 Oksidacijska stabilnost

Tijekom eksploatacije, maziva ulja su često duži vremenski period uz prisustvo kisika izložena visokim temperaturama. Pri tome dolaze u dodir sa materijalima koji pokazuju katalitičko djelovanje, kao što su na primjer metali. Pri takvim uvjetima dolazi do tzv. starenja ulja. S jedne strane se oslobađaju slobodne i vezane kiseline, kao produkti starenja, putem procesa oksidacije, a s druge strane smolasta tvar kao rezultat reakcija oksidacije i polimerizacije. Ova smolasta tvar je u početnom stadiju rastvorljiva u mazivom ulju, a zatim se u toku daljnjeg starenja u njemu izdvajaju u obliku taloga. U principu parafinski ugljikovodivi su skloni da stvaraju kiseline i kondezacijske produkte koji dovode do porasta viskoznosti ulja. Aromatski ugljikovodici su podložni oslobađanju kondezacijskih molekulskih tvari koji izazivaju porast viskoznosti. Određivanje oksidacijske stabilnosti, to jest starenja ima za cilj procjenjivanje vijeka uporabe i ponašanja mazivog ulja u pogonu. Iz tih se razloga, pri izvođenju oksidacijskih ispitivanja trebaju odabrati uvjeti koji najviše odgovaraju uvjetima u praksi. Oksidacijska stabilnost gotovih motornih ulja se određuje u ispitnim motorima. Bitni parametri u oksidacijskim ispitivanjima, vrijeme ispitivanja, temperatura, oksidacijsko sredstvo i katalizator utječu na rezultate ispitivanja na karakterističan način i moraju međusobno biti usklađeni u odnosu jedan na drugoga.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1 Uređaji

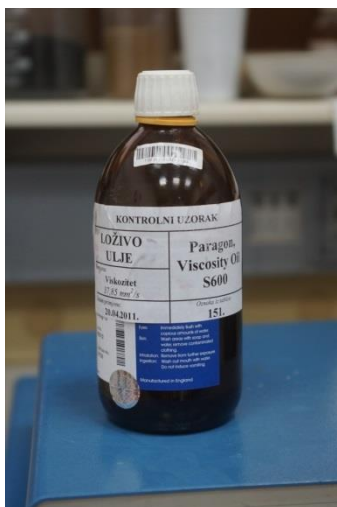
Za mjerenje kinematičke viskoznosti ulja korištena su tri Ostwaldova viskozimetra različitih debljina kapilara. Za njihovo pričvršćivanje bio je potreban stalak koji osigurava uronjenost viskozimetra u kupci u vertikalnom položaju bez prisustva vibracija. Za mjerenje dinamičke viskoznosti korišten je Höpplerov viskozimetar tvrtke Haake. Za održavanje stalne mjerne temperature korištena je termostatirajuća kupka Eco silver E4S tvrtke Lauda gdje je kao sredstvo za održavanje temperature korištena vodovodna voda čija je temperatura tijekom mjerenja konstantno provjeravana s neovisnim termoparom. Temperatura se ne smije mijenjati po dužini kupke više od 0,01 °C. Radi održavanja jednolike temperature u svim područjima kupke korištena je magnetska miješalica. Kako bi postupak bio u potpunosti proveden prema normi ASTM D 445 za mjerenje vremena upotrijebljena je štoperica čija je preciznost $\pm 0,2$ s i ima točnost od najmanje 0,05% kada je testirana preko intervala od 15 min.

3.2 Postupak kalibracije Ostwaldova viskozimetra

Prije samog provođenja kalibracije bilo je potrebno očistiti i osušiti viskozimetre. To je urađeno na način da su prvo očišćeni acetonom, pa zatim deterdžentom Hellmanex i naposljetku propuhivanjem suhog zraka s pumpicom čija je protočnost 2,1 L/min kroz viskozimetar radi sušenja unutrašnje stijenke. Mjerenje je rađeno s određenim referentnim uljem kojemu su kinematička viskoznost i gustoća pri određenim temperaturama već unaprijed poznate. Kalibracija viskozimetara izvršena je na dvije temperature: 20 °C i 40 °C.



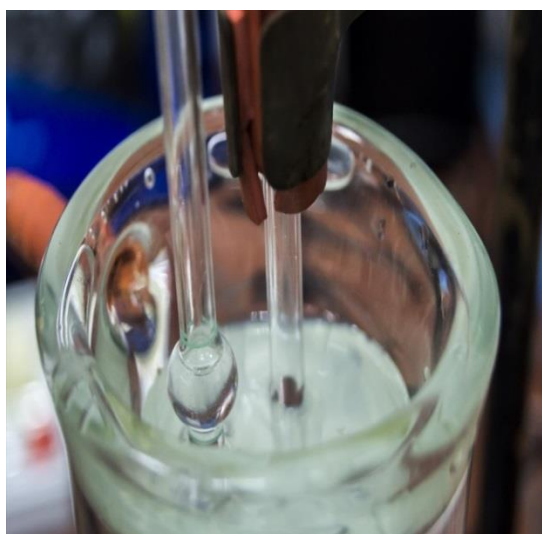
Slika 9. Uzorci ulja

**Slika 10.a Referentno ulje****Slika 10.b Doziranje referentnog ulja**

U svaki od viskozimetara stavljena je određena doza uzorka pazeći pritom da se ne stvore zračni mjehurići. Viskozimetar s uzorkom učvršćen je na stalak kojim je podešavana uronjenost uzorka ispod površine vode za oko 20 mm gdje je voda strujala oko stijenke posude. Pomoću sisaljke se namještao nivo ulja malo preko prve oznake na viskozimetru (oko 5 mm). Kad se razina ulja pod djelovanjem gravitacijske sile počela spuštati i kad se razina poklopila s prvom oznakom na cijevi uključeno je odbrojavanje na štoperici.

**Slika 11. Podizanje razine referentnog ulja**

Tijekom spuštanja ulja bilo je potrebno promatrati temperaturu vode u kupki i paziti da uvijek bude konstantna. Mjerenje vremena se vrši sve dok se razina ulja ne spusti do druge oznake na viskozimetru i ne smije biti manje od 200 s. U tom slučaju se uzima viskozimetar s užom kapilalom i ponavlja se proces. Za svaki viskozimetar obavljena su po tri mjerenja pri čemu je bitno da ne bude većih odstupanja u vremenima i za svako mjerenje izračunata je konstanta prema (2.2). Ukupna konstanta za određeni viskozimetar za mjerenje pri određenoj temperaturi se dobiva kao srednja vrijednost.



Slika 12. Viskozimetar s referentnim uljem

3.2. 1. Kalibracija prvog viskozimetra

Tablica 2. Kalibracija prvog viskozimetra na 20 °C

1.viskozimetar	20 °C	20 °C	20 °C
Mjerenje	1	2	3
ν (viskoznost, cSt)	2141	2141	2141
t (vrijeme, s)	1000,3	997	994,8
C (konstanta)	2,140	2,147	2,152
Prosjek	2,147		
St.dev	0,00595		

Tablica 3. Kalibracija prvog viskozimetra na 40 °C

1. viskozimetar	40 °C	40 °C	40 °C	40 °C	40 °C	40 °C
Mjerenje	1	2	3	4	5	6
ν (viskoznost, cSt)	523,9	523,9	523,9	523,9	523,9	523,9
t (vrijeme, s)	254,2	256,2	260,8	264,2	264,8	263,8
C (konstanta)	2,061	2,044	2,008	1,983	1,978	1,986
Prosjek	2,038			1,982		
St.dev	0,0267			0,00377		

Iz Tablice 3. je vidljivo da su prva tri mjerenja odbačena zbog velikih odstupanja vremena koja su posljedica nedovoljne progrijanosti uzorka ulja na temperaturu od 40 °C. Prvi viskozimetar koji je korišten je viskozimetar s najširoom kapilaram. Vrijednost konstante tog viskozimetra za temperaturu od 20 °C iznosi $C = 2,147$, a za temperaturu od 40 °C iznosi $C = 1,982$.

3.2. 2. Kalibracija drugog viskozimetra

Tijekom kalibracije drugog viskozimetra koji ima užu kapilaru od prvog, vrijeme protjecanja referentnog ulja pri temperaturi od 20 °C je bilo predugo i zato je kao referentno korišteno ulje INA Delta 5 15W-40 kojemu je kinematička viskoznost na 20 °C dobivena u laboratoriju INA Maziva. Kalibracija pri 40 °C je provedena s referentnim uljem.

Tablica 4. Kalibracija drugog viskozimetra na 20 °C

2. viskozimetar	20 °C	20 °C	20 °C
Mjerenje	1	2	3
ν (viskoznost, cSt)	343,3	343,3	343,3
t (vrijeme, s)	1583,65	1583,42	1580,54
C (konstanta)	0,2168	0,2168	0,2172
Prosjek	0,2169		
St.dev	0,0002		

Tablica 5. Kalibracija drugog viskozimetra na 40 °C

2. viskozimetar	40 °C	40 °C	40 °C
Mjerenje	1	2	3
ν (viskoznost, cSt)	523,9	523,9	523,9
t (vrijeme, s)	2331,9	2330,2	2331,5
C (konstanta)	0,2247	0,2248	0,2247
Prosjek	0,2247		
St.dev	8,57E-05		

Vrijednost konstante drugog viskozimetra za temperaturu od 20 °C iznosi $C = 0,2169$, a za temperaturu od 40 °C iznosi $C = 0,2247$.

3.2.3 Kalibracija trećeg viskozimetra

Kalibraciju za treći viskozimetar koji je ujedno viskozimetar s najužom kapilalom provedena je s uljem INA Ultrastar FE 5W-30 na temperaturi od 20 °C i INA Move 5W-30 na temperaturi od 40 °C. Iznos točne viskoznosti ulja za temperaturu od 20 °C je izmjerena u laboratoriju INA Maziva, a za 40 °C izmjerena je u Centralnom kemijsko-tehnološkom laboratoriju HEP-a, akreditiranim laboratorijima za takvu vrstu mjerenja u Republici Hrvatskoj te je prema njima izračunata konstanta.

Tablica 6. Kalibracija trećeg viskozimetra na 20 °C

3. viskozimetar	20 °C	20 °C	20 °C
Mjerenje	1	2	3
ν (viskoznost, cSt)	185,8	185,8	185,8
t (vrijeme, s)	2080,18	2081,88	2083,88
C (konstanta)	0,0893	0,0892	0,0892
Prosjek	0,0892		
St.dev	0,0001		

Tablica 7. Kalibracija trećeg viskozimetra na 40 °C

3. viskozimetar	40 °C	40 °C	40 °C
Mjerenje	1	2	3
ν (viskoznost, cSt)	69,44	69,4	69,44
t (vrijeme, s)	770,9	769,3	770,7
C (konstanta)	0,0900	0,0902	0,0901
Prosjek	0,09015		
St.dev	0,0001		

Vrijednost konstante trećeg viskozimetra za temperaturu od 20 °C iznosi $C = 0,0892$, a za temperaturu od 40 °C iznosi $C = 0,09015$.

3.3 Usporedba rezultata kinematičke viskoznosti

3.3.1 Usporedba s rezultatima dobivenim u HEP – ovom laboratoriju

Za provjeru točnosti mjerenja, dva uzorka ulja, INA Super 3 15W- 40 i INA Move 5W- 30, odnešena su u Centralno kemijsko-tehnološki laboratorij HEP-a gdje su dobiveni rezultati kinematičke viskoznosti uzoraka pri temperaturama 40 °C i 100 °C.

Tablica 8. Rezultati mjerenja u akreditiranom laboratoriju HEP-a

Vrsta uzorka	Kinematička viskoznost v [mm ² /s] na 40 °C	Kinematička viskoznost v [mm ² /s] na 100 °C
INA Super 3 15W-40	107,44	14,091
INA Move 5W-30	69,44	11,66

Također su ti isti uzorci izmjereni i u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo FSB-a, gdje su razlike u iznosu viskoznosti malene.

Tablica 9. Usporedba rezultata laboratorijskih mjerenja FSB –a i HEP -a

Vrsta uzorka		Kinematička viskoznost v [mm ² /s] na 40 °C
INA Super 3 15W-40	HEP	107,44
	FSB	117,0415
INA Move 5W-30	HEP	69,44
	FSB	75,2035



Slika 13. Mjerenje uzorka INA Super 3 15W-40 na 40 °C



Slika 14. Mjerenje uzorka INA Move 5W-30 na 40 °C

Tablica 10. Odstupanje rezultata između mjerenja FSB-a i HEP-a

	Vrsta ulja	
	INA Super 3 15W-40	INA Move 5W-30
Odstupanje %	8,20	7,66

3.3. 2. Usporedba s rezultatima dobivenim u laboratoriju INA Maziva

Iz laboratorija INA Maziva su dobiveni rezultati kinematičke viskoznost ulja INA Delta 5 15W-40, INA Super 2000 10W-40, INA Super 3 40 i INA Ultra Star FE 5W-30 na temperaturi 20 °C gdje su rezultati uspoređeni s rezultatima dobivenim u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo FSB-a.

Tablica 11. Rezultati mjerenja u akreditiranom laboratoriju INA Maziva

Vrsta uzorka	Kinematička viskoznost ν [mm ² /s] na 20 °C
INA Delta 5 15W-40	343,3
INA Super 2000 10W-40	247,5
INA Super 3 40	564,4
INA Ultra Star FE 5W-30	185,8

Tablica 12. Usporedba rezultata laboratorijskih mjerenja FSB – a i INA Maziva

Vrsta uzorka	Kinematička viskoznost ν [mm ² /s] na 40 °C	
INA Delta 5 15W-40	INA	343,3
	FSB	335,323
INA Super 2000 10W-40	INA	247,5
	FSB	245,208
INA Super 3 40	INA	564,4
	FSB	565,675

Tablica 13. Odstupanja rezultata između mjerenja FSB-a i INA Maziva

	Vrsta ulja		
	INA Delta 5 15W-40	INA Super 2000 10W-40	INA Super 3 40
Odstupanje %	2,32	0,9	0,21

3.4 Postupak kalibracije Höpplerovog viskozimetra

Za mjerenje dinamičke viskoznosti korišten je Höpplerov viskozimetar tvrtke Haake. Kalibracija viskozimetra je provedena s istim referentnim uljem koje se koristilo i za kalibraciju Ostwaldovog viskozimetra i uljem iz INA Maziva čije su vrijednosti gustoće i kinematičke viskoznosti pri određenim temperaturama dobivene mjerenjem u njihovom laboratoriju. Höpplerov viskozimetar po DIN-u 53015 koristi šest vrsta kuglica od čega su dvije od borosilikatnog stakla, dvije od Ni-željeza, jedna od Ni-željeza ili čelika i jedna od čelika.

Tablica 14. Vrste i svojstva kuglica Höppler-ovog viskozimetra [8]

Broj kuglice	Materijal	Gustoća [g/cm ³]	Promjer [mm]	Odstupanje [mm]	Konstanta K [mPa*s*cm ³ / g*s]	Dinamička viskoznost [mPa*s]
1	Borosilikatno staklo	2,4	15,81 ± 0,01	± 0,0005	0,007	0,6 - 10
2	Borosilikatno staklo	2,4	15,6 ± 0,05	± 0,0005	0,09	7 - 130
3	Ni-željezo	8,1	15,6 ± 0,05	± 0,001	0,09	30 - 700
4	Ni-željezo	8,1	15,2 ± 0,1	± 0,001	0,7	200 - 4800
5	Ni-željezo ili čelik	7,7 - 8,1	14,0 ± 0,5	± 0,001	7	1500 - 45000
6	Čelik	7,7 - 7,8	11,0 ± 1	± 0,002	35	> 7500

Kalibracija Höppler-ovog viskozimetra u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo FSB-a je provedena za kuglice pod brojevima 1, 3, i 4. Kalibracijska konstanta je dobivena iz formule [8]:

$$\eta = t \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot K \quad [\text{mPas}] \quad (3.1)$$

pri čemu je: t - vrijeme, s

ρ_1 - gustoća kuglice, g/cm³

ρ_2 - gustoća uzorka, g/cm³

K - konstanta, mPa · s · cm³ / g · s

Postupak je odrađen tako da je određena količina referentnog ulja dozirana u staklenu cijev s kuglicom koja se nalazi zatvorena u kućištu pod nagibom $10^\circ \pm 1^\circ$. Između staklene cijevi i kućišta se kao sredstvo za održavanje stalne temperature nalazi voda čija je temperatura kontrolirana termometrom mjerne podjele $0,1^\circ\text{C}$. Okretanjem kućišta za 180° oko poprečne osi kuglica svojim padanjem dolazi do prve oznake na cijevi gdje počinje odbrojavanje na štoperici. Mjerenje vremena padanja kuglice je prekinuto u trenutku kad je kuglica došla do druge oznake na cijevi. Prema DIN 53015 vrijeme padanja kuglice broj 1 između oznaka mora biti > 60 s, kuglice broj 2 i 4 mora biti > 50 s i kuglice broj 5 i 6 > 30 s. Zatim uz poznato vrijeme padanja kuglice, gustoću kuglice i gustoću uzorka pri mjernoj temperaturi konstanta K se izračunava prema (3.1).

3.4.1 Kalibracija kuglice broj 1

Kao referentno je korišteno ulje INA Ultrastar FE 5W-30 gdje je korištena dinamička viskoznost dobivena mjerenjem u laboratoriju INA Maziva.

Tablica 15. Kalibracija kuglice broj 1 na temperaturama 20°C

Tip kuglice	kuglica No.1		
Uzorak	INA Ultra Star FE 5W-30		
Temperatura [$^\circ\text{C}$]	20 $^\circ\text{C}$		
Mjerenje	1	2	3
η (viskoznost, mPas)	158,2644	158,2644	158,2644
t (vrijeme, s)	258,5	258,14	258,72
ρ_1 (gust.kuglice, g/cm^3)	2,217	2,217	2,217
ρ_2 (gust.uzorka, g/cm^3)	0,8518	0,8518	0,8518
K (konstanta)	0,8358	0,837	0,8351
Prosjek	0,836		
St.dev.	0,0009		

Dobivena konstanta K za kuglicu broj 1 iznosi $K = 0,836$

3.4.2 Kalibracija kuglice broj 3

Kalibracija kuglice broj 3 je provedena s referentnim uljem.

Tablica 16. Kalibracija kuglice broj 3 na temperaturama 20 °C, 25 °C i 40 °C

Tip kuglice	kuglica No.3								
Uzorak	Kalibracijsko ulje								
Temperatura [°C]	20 °C			25 °C			40 °C		
Mjerenje	1	2	3	1	2	3	1	2	3
η (viskozmost, mPas)	1875	1875	1875	1271	1271	1271	452,6	452,6	452,6
t (vrijeme, s)	313,62	313,43	313,42	209,94	210,77	211,29	74,9	74,52	74,85
ρ_1 (gust.kuglice, g/cm ³)	8,138	8,138	8,138	8,138	8,138	8,138	8,138	8,138	8,138
ρ_2 (gust.uzorka, g/cm ³)	0,8758	0,8758	0,8758	0,8728	0,8728	0,8728	0,8639	0,8639	0,8639
K (konstanta)	0,8232	0,8237	0,8238	0,8333	0,8300	0,8280	0,8307	0,8350	0,8313
Prosjek	0,8288								
St.dev.	0,0044								

Dobivena konstanta K za kuglicu broj 3 iznosi $K = 0,8288$.

3.4.3 Kalibracija kuglice broj 4

Kalibracija kuglice broj 4 je provedena s referentnim uljem.

Tablica 17. Kalibracija kuglice broj 4 na temperaturama 20 °C i 40 °C

Tip kuglice	kuglica No.4					
Uzorak	Kalibracijsko ulje					
Temperatura [°C]	20 °C			40 °C		
Mjerenje	1	2	3	1	2	3
η (viskozmost, mPas)	1875	1875	1875	452,6	452,6	452,6
t (vrijeme, s)	124,990	123,870	124,730	30,250	30,160	29,880
ρ_1 (gust.kuglice, g/cm ³)	8,130	8,130	8,130	8,130	8,130	8,130
ρ_2 (gust.uzorka, g/cm ³)	0,876	0,876	0,876	0,864	0,864	0,864
K (konstanta)	2,068	2,087	2,072	2,059	2,065	2,085
Prosjek	2,07265					
St.dev.	0,01094					

Dobivena konstanta K za kuglicu broj 4 iznosi $K = 2,07265$.

3.5 Usporedba rezultata dinamičke viskoznosti FSB –a i INA Maziva

Za provjeru točnosti mjerenja, rezultati su uspoređeni s vrijednostima dinamičke viskoznosti dobivenim u laboratoriju INA Maziva.

Tablica 18. Rezultati mjerenja u akreditiranom laboratoriju INA Maziva

Vrsta uzorka	Dinamička viskoznost η [mPas] na 20 °C
INA Delta 5 15W-40	300,422
INA Super 3 40	497,688

Tablica 19. Usporedba rezultata laboratorijskih mjerenja FSB – a i INA Maziva

Vrsta uzorka		Dinamička viskoznost η [mPas] na 20 °C
INA Delta 5 15W-40	INA	300,422
	FSB	290,561
INA Super 3 40	INA	497,688
	FSB	472,816

Tablica 20. Odstupanja rezultata između mjerenja FSB-a i INA Maziva

	Vrsta ulja	
	INA Delta 5 15W-40	INA Super 3 40
Odstupanje %	3,28	5



Slika 15. Kalibracija kuglice broj 4

ZAKLJUČAK

Usporedbom rezultata dobivenih mjerenjem viskoznosti na Ostwaldovom i Höpplerovom viskozimetru ustanovljeno je kako temperatura znatno utječe na viskoznost ulja što prikazuje tablica 16. Visoka razlika u viskoznosti s povećanjem temperature se naročito vidi kod ulja koja imaju višu vrijednost viskoznosti pri sobnoj temperaturi, tj. mineralnih ulja. Rezultati mjerenja u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo FSB-a razlikuju se u malim postocima od rezultata ispitivanja u Centralnom kemijsko-tehnološkom laboratoriju HEP-a i u laboratoriju INA-Maziva. Uzrok tome stoji u više činjenica. Najveća odstupanja rezultata vidljiva su u usporedbi s rezultatima ispitivanja u Centralnom kemijsko-tehnološkom laboratoriju HEP-a (8,2%) iz razloga što je kinematička viskoznost ulja dobivena pomoću viskozimetra kojemu je kalibracijska konstanta dobivena mjerenjem kalibracijskog ulja povišene viskoznosti u odnosu na uobičajene vrijednosti za motorna ulja. Dodatna odstupanja mogu biti osim u nepreciznim vrijednostima kinematičke viskoznosti kalibracijskog ulja radi starosti ulja te sam ljudski faktor, kao i točnost mjernih uređaja (termostatirajuća kupka, štoperica i dr.). U usporedbi s rezultatima laboratorija INA-Maziva odstupanja se kreću od 0,21% – 2,32%. Razlog tako manjim odstupanjima u odnosu na laboratorij HEP-a je što su kinematičke viskoznosti ulja dobivene viskozimetrima koji su kalibrirani prema uljima čije su vrijednosti viskoznosti na određenim temperaturama prethodno dobivene u laboratoriju INA-Maziva. Postupak preračunavanja kinematičke viskoznosti u dinamičku, iako slijedi iz norme, unosi sa sobom određenu grešku, tako kod usporedbe dinamičke viskoznosti sa vrijednostima dobivenim iz laboratorija INA-Maziva odstupanja se kreću od 3,28% - 5%.

LITERATURA

- [1] Mario Šavar, Zdravko Virag, Ivo Džijan, Mehanika fluida - predavanja, skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [2] Maziva i podmazivanje, Jugoma, Savez Jugoslavenskih društava za primjenu goriva i maziva, Zagreb 1986 god.
- [3] Ismet Demirdžić, Mehanika fluida. Prvi dio, Strojarski fakultet u Sarajevu, Sarajevo, 1991.
- [4] Davor Ljubas, Podloge za predavanje i vježbe iz kolegija Gorivo i mazivo, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [5] <http://www.sintrexcorporation.com/reverse-flow-viscometer.html> (zadnji pristup: 10.02.2015)
- [6] ISO 3104, second edition, 1994.
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Stokes%27_law (zadnji pristup: 16.02.2015)
- [8] DIN 53015, 2001.
- [9] ASTM D445-14a, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), ASTM International, West .
. Conshohocken, PA, 2014