

# Ispitivanje fizikalnih i kemijskih svojstva ulja za kaljenje

---

**Marinčić, Andrija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:843634>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-08**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Andrija Marinčić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Student:

Andrija Marinčić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Božidaru Matijeвиću, Izabeli Martinez, mag. ing. stoj. na pomoći tijekom izrade ovog rada. Također zahvaljujem se ostalim profesorima, asistentima, roditeljima, prijateljima i svima drugima koji su mi pomagali i podupirali me u toku pohađanja preddiplomskog studija Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Andrija Marinčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1                                 |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -                                    |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Andrija Marinčić** JMBAG: **0035211271**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje fizikalnih i kemijskih svojstava ulja za kaljenje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Examination of physical and chemical properties of hardening oil**

Opis zadatka:

Različite vrste ulja se između ostalog koriste kao medij za ohlađivanje u procesu kaljenja. Brzina ohlađivanja kod ulja se može mijenjati zbog različitih utjecaja kao što su: kemijski sastav ulja, temperatura ulja, promjena brzine gibanja ulja, namjerno dodavanje vode u ulja te promjenom svojstava tijekom eksploatacije. U Laboratoriju za toplinsku obradu nalaze se različiti uređaji za ohlađivanje prilikom gašenja u kojima se mogu primjenjivati kako različita sredstva za gašenje tako i mijenjati uvjete rada tih sredstava (brzinu gibanja, temperaturu, ...). Pored sposobnosti ohlađivanja ulja za kaljenje važna su fizikalna i kemijska svojstva ulja. U završnom radu potrebno je opisati ulja za kaljenje te primjenom standardiziranih laboratorijskih metoda za određivanje fizikalnih i kemijskih svojstava provesti ispitivanja karakterističnih svojstava odabranog uzorka ulja. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

|  |     |
|--|-----|
| SADRŽAJ .....  | I   |
| POPIS SLIKA .....  | III |
| POPIS TABLICA.....   | IV  |
| POPIS OZNAKA .....   | V   |
| SAŽETAK.....   | VI  |
| SUMMARY .....  | VII |
| 1. UVOD.....   | 1   |
| 2. POSTUPAK KALJENJA .....   | 2   |
| 2.1. Općenito o postupku kaljenja.....   | 2   |
| 2.2. Gašenje.....  | 3   |
| 3. BILJNA ULJA.....  | 6   |
| 3.1. Biljna ulja za kaljenje kroz povijest.....                                    | 6   |
| 3.2. Prednosti biljnih ulja za kaljenje.....                                       | 6   |
| 3.3. Nedostatci biljnih ulja za kaljenje.....                                      | 7   |
| 4. FIZIKALNA I KEMIJSKA SVOJSTVA ULJA ZA KALJENJE.....                             | 8   |
| 4.1. Viskoznost.....   | 8   |
| 4.2. Indeks viskoznosti.....   | 10  |
| 4.3. Gustoća.....  | 11  |
| 4.4. Plamište.....   | 12  |
| 4.5. Točka tečenja .....   | 13  |
| 4.6. Korozija na bakru.....  | 13  |
| 4.7. Bazni i kiseli broj .....   | 14  |
| 4.8. Isparljivost.....   | 15  |
| 4.9. IR analiza .....  | 15  |
| 4.10. Izgled i boja.....   | 16  |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO .....   | 17  |
| 5.1. Metode karakterizacije fizikalnih i kemijskih svojstava ulja za kaljenje..... | 17  |
| 5.1.1. Ispitivanje viskoznosti ulja .....  | 17  |
| 5.1.2. Ispitivanje gustoće ulja .....  | 20  |
| 5.1.3. Mjerenje točke plamišta.....  | 21  |
| 5.1.4. Mjerenje točke tečenja .....  | 22  |
| 5.1.5. Određivanje korozije na bakru.....  | 23  |
| 5.1.6. Određivanje baznog i kiselinskog broja.....                                 | 25  |
| 5.1.7. Ispitivanje isparljivosti – Noack test.....                                 | 26  |
| 5.1.8. IR fotospektrometrija .....   | 27  |
| 5.2. Rezultati ispitivanja.....  | 27  |
| 5.2.1. Rezultati ispitivanja viskoznosti .....                                     | 28  |
| 5.2.2. Vrijednosti indeksa viskoznosti .....                                       | 28  |
| 5.2.3. Rezultati ispitivanja gustoće .....   | 28  |
| 5.2.4. Rezultati određivanja točke tečenja .....                                   | 28  |

---

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 5.2.5.  | Rezultati određivanja točke plamišta .....                             | 29 |
| 5.2.6.  | Rezultat ispitivanja korozivnosti na bakru.....                        | 29 |
| 5.2.7.  | Rezultati određivanja kiselinskog i baznog broja .....                 | 29 |
| 5.2.8.  | Rezultati ispitivanja gubitka isparavanja .....                        | 29 |
| 5.2.9.  | Rezultati ispitivanja IR fotospektrometrijom.....                      | 30 |
| 5.2.10. | Rezultati karakterizacije izgleda i boje .....                         | 30 |
| 6.      | ANALIZA REZULTATA .....  | 31 |
| 6.1.    | Rezultati ispitivanja svojstava konvencionalnog ulja za kaljenje ..... | 31 |
| 6.2.    | Usporedba rezultata.....   | 32 |
| 7.      | ZAKLJUČAK.....   | 35 |
|         | LITERATURA.....  | 36 |
|         | PRILOZI.....   | 37 |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Općeniti dijagram postupka toplinske obrade metala [1] .....                       | 2  |
| Slika 2. Primjer TTT dijagrama za jedan podeutektoidni čelik [2].....                       | 4  |
| Slika 3. Idealna krivulja gašenja u TTT dijagramu [4] .....                                 | 5  |
| Slika 4. Skica kapilarnog viskozimetra [7] .....  | 9  |
| Slika 5. Ovisnost viskoznosti o temperaturi za određivanje indeksa viskoznosti.....         | 10 |
| Slika 6. Skica metode mjerenja plamišta .....   | 12 |
| Slika 7. Kapilarni viskozimetar korišten za mjerenje kinematičke viskoznosti pri 40°C ..... | 18 |
| Slika 8. Kapilarni viskozimetar za mjerenje kinematičke viskoznosti pri 100°C .....         | 19 |
| Slika 9. Krupni plan kapilare unutar kapilarnog viskozimetra.....                           | 20 |
| Slika 10. Automatski uređaj za određivanje gustoće .....                                    | 21 |
| Slika 11. Automatski uređaj za određivanje točke plamišta .....                             | 22 |
| Slika 12. Automatski uređaj za određivanje točke tečenja.....                               | 23 |
| Slika 13. Uređaj za ispitivanje oksidacijske otpornosti ulja za kaljenje .....              | 24 |
| Slika 14. ASTM ljestvica .....  | 25 |
| Slika 15. Automatski uređaj za određivanje svojstva isparavanja Noack testom .....          | 26 |
| Slika 16. IR fotospektrometar .....   | 27 |
| Slika 17. Rezultati ispitivanja IR analizom.....  | 30 |
| Slika 18. Rezultati IR analize konvencionalnog ulja za kaljenje .....                       | 32 |



**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 1. Kinematička viskoznost na temperaturama od 40 °C i 100 °C.....      | 28 |
| Tablica 2. Indeks viskoznosti .....  | 28 |
| Tablica 3. Rezultati ispitivanja gustoće.....                                  | 28 |
| Tablica 4. Rezultati ispitivanja točke tečenja.....                            | 28 |
| Tablica 5. Rezultati ispitivanja plamišta .....                                | 29 |
| Tablica 6. Rezultati ispitivanja baznog i kiselinskog broja.....               | 29 |
| Tablica 7. Rezultati Noack testa.....  | 29 |
| Tablica 8. Fizikalna i kemijska svojstva konvencionalnog ulja za kaljenje..... | 31 |

**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b>        | <b>Jedinica</b>    | <b>Opis</b>   |
|----------------------|--------------------|---|
| <i>H</i>             | mm <sup>2</sup> /s | Iznos kinematičke viskoznosti referentnog ulja visokog indeksa viskoznosti na temperaturi od 40°C |
| <i>IV</i>            |                    | Indeks viskoznosti  |
| <i>L</i>             | mm <sup>2</sup> /s | Iznos kinematičke viskoznosti referentnog ulja niskog indeksa viskoznosti na temperaturi od 40°C  |
| <i>m</i>             | g                  | Masa  |
| <i>T</i>             | K                  | Apsolutna temperatura   |
| <i>t</i>             | s                  | Vrijeme   |
| <i>U</i>             | mm <sup>2</sup> /s | Iznos kinematičke viskoznosti ispitivanog ulja čiji se indeks viskoznosti ispituje                |
| <i>V</i>             | cm <sup>3</sup>    | Volumen   |
| <i>η</i>             | Pa s               | Dinamička viskoznost  |
| <i>η<sub>1</sub></i> | Pa s               | Dinamička viskoznost fluida koji se ispituje  |
| <i>η<sub>2</sub></i> | Pa s               | Dinamička viskoznost fluida koji je korišten za baždarenje  |
| <i>ρ<sub>1</sub></i> | g/cm <sup>3</sup>  | Gustoća fluida koji se ispituje   |
| <i>ρ<sub>2</sub></i> | g/cm <sup>3</sup>  | Gustoća fluida koji se ispituje   |
| <i>θ</i>             | °C                 | Temperatura   |

## **SAŽETAK**

Postupak kaljenja je postupak toplinske obrade koji se provodi u svrhu povećanja mehaničkih svojstava materijala. Prilikom postupka kaljenja, da bi se dobila određena željena svojstva materijala, u većini slučajeva kod legiranih čelika nije povoljno gašenje u vodi, jer u predmetu nastaju neželjena naprezanja i pukotine. Stoga se takvi čelici gase u ulju za kaljenje, te tako sporijim hlađenjem, dobivaju odgovarajuća svojstva. Općenito, svojstva materijala nakon gašenja, osim što ovise o svojstvima materijala koji se toplinski obrađuje, ovise i o svojstvima medija u kojem se materijal gasi. Poznavanjem fizikalnih i kemijskih svojstava ulja za kaljenje možemo preciznije kontrolirati proces gašenja. U ovom radu obradit će se fizikalna i kemijska svojstva ulja u postupku kaljenja na uzorcima koji će predstavljati grupu biljnih ulja. Također, u radu će se fizikalna i kemijska svojstva usporediti s rezultatima konvencionalnog ulja za kaljenje.

Ključne riječi: kaljenje, gašenje, fizikalna i kemijska svojstva ulja, ulja za kaljenje

## **SUMMARY**

The hardening process is a heat treatment process that is carried out in order to increase the mechanical properties of the material. During the hardening process, in order to obtain certain desired properties of the material, quenching in water is not sufficient in most cases with alloy steel, because unwanted stresses and cracks occur in the object. Therefore, such steels are quenched in quenching oil, and with this slower cooling, they acquire the appropriate properties. In general, the properties of the material after quenching, in addition to depending on the properties of the heat-treated material, also depend on the properties of the medium in which the material is quenched. By knowing the physical and chemical properties of the quenching oil, we can more precisely control the quenching process. In this paper, the physical and chemical properties of oil in the hardening process will be processed, and this will be done on samples of vegetable oils. Also, the paper will compare the physical and chemical properties with the results of conventional quenching oil.

Key words: Hardening, Quenching, Physical and Chemical Properties of Oil, Quenching Oil

## **1. UVOD**

Svojstva materijala su uvijek predstavljala jedan od najvećih zahtjeva prilikom konstruiranja bilo čega u stvarnom životu. Proučavanje i poboljšavanje tih svojstava kroz povijest donijelo je velik napredak čovječanstvu i omogućilo donedavno nezamislive konstrukcije.

Kaljenje je postupak koji pripada skupini postupaka toplinske obrade materijala. Postupak kaljenja sastoji se od zagrijavanja materijala na temperaturu austenitizacije, držanja materijala na toj temperaturi te hlađenja na sobnu temperaturu. Primarna svojstva koja se poboljšavaju kaljenjem su tvrdoća i čvrstoća čelika. Osim što ovisi o vrsti materijala, načinu i brzini zagrijavanja te vremenu držanja na temperaturi austenitizacije, struktura materijala nakon kaljenja ponajviše će ovisiti o brzini hlađenja materijala. Različiti mediji hlađenja davat će različite brzine hlađenja, te stoga i drugačija svojstva materijala. Za postupak kaljenja, kao medij za hlađenje materijala, najčešće se koriste voda, ulja za kaljenje, inertni plinovi te zrak.

Ulja za kaljenje su najčešći medij koji se koristi tokom hlađenja materijala u postupku kaljenja jer pravim odabirom ulja i vremena hlađenja dobivamo željenu mikrostrukturu, te s tim i željena svojstva. Osim same sposobnosti ohlađivanja ulja za kaljenje, izrazito su važna i fizikalna i kemijska svojstva tog ulja.

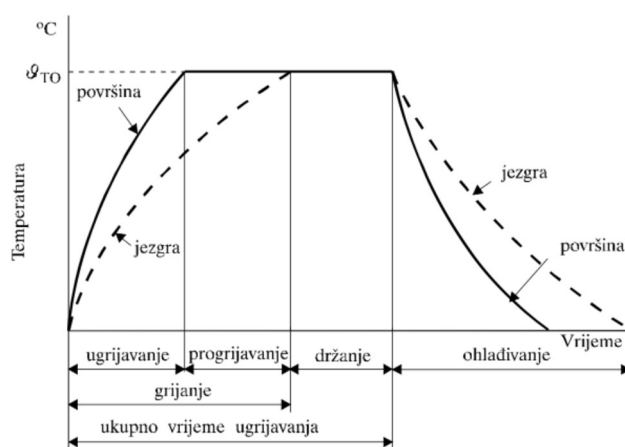
U teorijskom dijelu ovog rada sažeto će se opisati postupak kaljenja, odnosno gašenja te primjena biljnih ulja u svrhu kaljenja. Nadalje, detaljno će se opisati fizikalna i kemijska svojstva ulja te standardizirane metode ispitivanja navedenih svojstava. U eksperimentalnom dijelu rada ispitat će se svojstva tri bilja ulja (maslinovog, repičinog i kokosovog) i jednog konvencionalnog ulja za kaljenje te će se na temelju analize rezultata ulja međusobno usporediti.

## 2. POSTUPAK KALJENJA

### 2.1. Općenito o postupku kaljenja

Kaljenje je najrašireniji postupak toplinske obrade metala. Toplinska obrada metala postupkom kaljenja provodi se sa svrhom dobivanja martenzitne strukture, te zbog toga povišene tvrdoće i čvrstoće. Postupak toplinske obrade metala se općenito sastoji od grijanja, držanja i hlađenja. Grijanje materijala u postupku kaljenja provodi se s ciljem zagrijavanja materijala na temperaturu austenitizacije. Martenzit je najtvrđa i najčvršća faza u kristalnoj rešetci željeza, a može nastati samo iz austenitne faze. Austenit je faza željeznog materijala koja je prisutna na visokim temperaturama. Ta temperatura na kojoj dolazi do pretvorbe u austenitnu fazu naziva se temperatura austenitizacije. Zagrijavanje se odvija u dvije faze: ugrijavanje i progrijavanje. Ugrijavanje je vrijeme potrebno da se površina obradka ugrije na zadanu temperaturu, a progrijavanje je vrijeme potrebno da se jezgra također ugrije na zadanu temperaturu te tako cijeli obradak bude u austenitnom području. Držanje u toplinskoj obradi postupka kaljenja predstavlja vrijeme potrebno za homogenizaciju strukture materijala, tj. za otapanje karbida, nečistoća itd. Hlađenje se tokom postupka kaljenja naziva i gašenje. Gašenje je hlađenje obradka tokom kaljenja brzinom većom od gornje kritične brzine gašenja te tako dobivanja martenzitne strukture, a izbjegavanje perlitne i bainitne strukture.

Na slici 1 prikazan je općeniti dijagram postupka toplinske obrade metala.



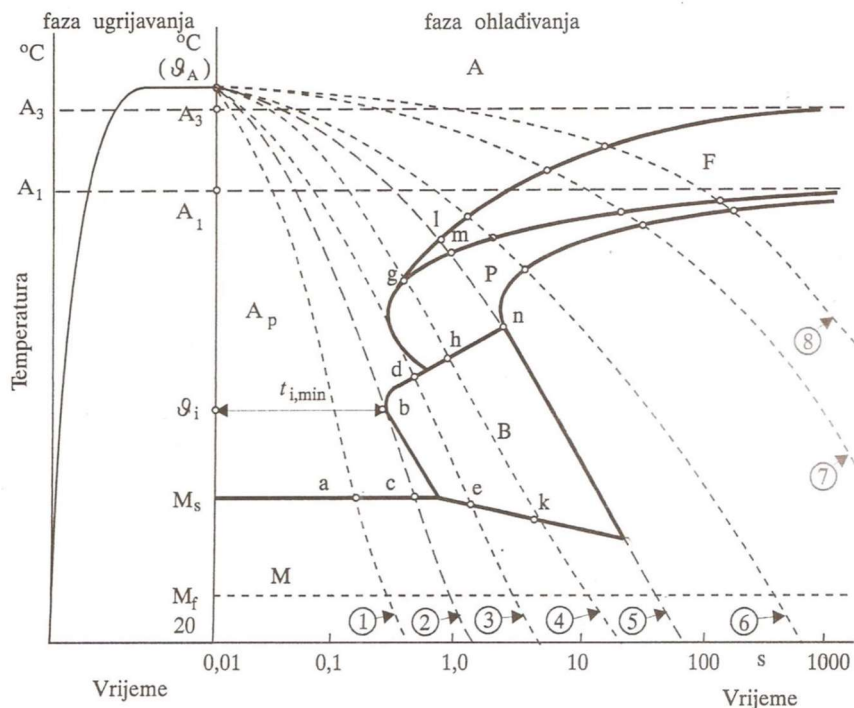
Slika 1. Općeniti dijagram postupka toplinske obrade metala [1]

## 2.2. Gašenje

Hlađenje je najbitnija faza u postupku kaljenja. Cilj hlađenja u kaljenu je dovoljno brzo ohladiti obradak da se otopljeni ugljik u austenitu ostane unutar kristalne rešetke.

Martenzit može nastat samo iz austenita, te se zato nakon zagrijavanja do austenitne faze obradak pokušava ohladiti da se izbjegnu faze koje utječu negativno na čvrstoću i tvrdoću. Nadkrično hlađenje naravno ima i svoje negativne strane. Naglim hlađenjem obradka u njemu nastaju zaostala naprezanja ili pukotine u materijalu, stoga se tokom kaljenja pokušava postići najmanja brzina hlađenja tokom koje ne dolazi do ulaska u perlitnu ili bainitnu fazu. Najmanja brzina će dovesti do najmanje mogućnosti pojave zaostalih naprezanja i pukotina. Sam materijal i njegov kemijski sastav utječu na najmanju moguću brzinu gašenja materijala, a poslije će ta ista brzina hlađenja odlučivati o sredstvu u kojem se obradak hladi. Hlađenje obradka, nakon prethodnog zagrijavanja na temperaturu austenitizacije, najbolje se opisuje TTT dijagramima. TTT dijagrami (*Temperature – Time - Transformation*) opisuju promjene u strukturi materijala u ovisnosti o brzini ohlađivanja. S obzirom kako je promjena strukture hlađenjem u ovisnosti o brzini ohlađivanja različita za svaki pojedini čelik, različiti su i TTT dijagrami čelika.

Primjer TTT dijagrama za jedan čelik dan je na slici 2. Iz predmetnog dijagrama se može uočiti linija hlađenja broj 2. Ona prikazuje najmanju moguću brzinu gašenja materijala koja će na kraju rezultirati potpuno martenzitnom strukturom i koja će izbjeći neželjena područja bainita i perlita.

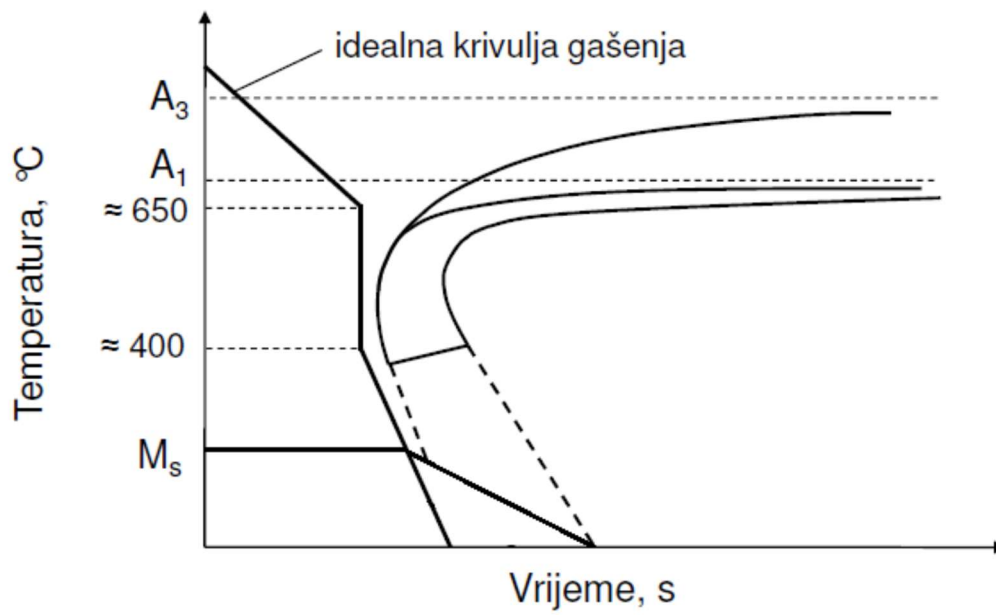


Slika 2. Primjer TTT dijagrama za jedan podeutektoidni čelik [2]

Medij s kojim se postiže jedna od većih brzina hlađenja je voda, ali se hlađenjem u vodi u materijalu pojavljuju neželjena naprezanja i pukotine. S obzirom na to, često se materijal podvrgava hlađenjem u ulju za kaljenje [3]. Primjenom različitih ulja za kaljenje, logično dobivaju se različite brzine hlađenja te s toga i drugačija svojstva. Brzina hlađenja ulja za kaljenje ovise o fizikalnim i kemijskim svojstvima ulja. U sljedećim poglavljima će se opisati najvažnija svojstva, navesti svojstva za naš uzorak te usporediti svojstva predmetnog uzorka sa konvencionalnim uljima za kaljenje.

Na slici 3 prikazana je idealna krivulja hlađenja u TTT dijagramu.





Slika 3. Idealna krivulja gašenja u TTT dijagramu [4]

### 3. BILJNA ULJA

U ovom radu predmetni uzorak neće predstavljati konvencionalna ulja za kaljenje nego biljna ulja. Na biljnim uljima će se opisivati fizikalna i kemijska svojstva te potom usporediti sa konvencionalnim uljima. Biljna ulja koja predstavljaju uzorak za ispitivanje su maslinovo ulje, kokosovo ulje te repičino ulje.

#### 3.1. Biljna ulja za kaljenje kroz povijest

Upotreba biljnih ulja u industriji smanjila se nakon Drugog svjetskog rata, jer su tada postale dostupne jeftinije alternative, poput mineralnih ulja. Međutim, u posljednjih nekoliko desetljeća došlo je do ponovnog porasta interesa za biljna ulja, posebice zbog njihovih ekoloških prednosti u odnosu na fosilna ulja. Biljna ulja mogu biti alternativa za fosilna ulja u mnogim sektorima, uključujući i toplinsku obradu materijala. Ulja koja su se najčešće koristila za toplinsku obradu materijala su ulje uljane repice i derivati sojinog ulja.

#### 3.2. Prednosti biljnih ulja za kaljenje

Ponovno oživljavanje interesa za biljna ulja povezano je s rastućom svjesnošću o potrebi smanjenja emisija stakleničkih plinova i zaštite okoliša. Većina tekućih sredstava za gašenje koja se koriste u industriji toplinske obrade temelje se na bazi naftnih ulja. Ta sredstva su vrlo učinkovita, ali se pokazalo da su toksična za okoliš. Osim toga, nakon upotrebe takvih sredstava za gašenje, njihovo zbrinjavanje može biti izazovno i skupo, jer često sadrže tvari koje su opasne po okoliš i zdravlje ljudi. Zato se sve više traže alternativna sredstva za gašenje koja su ekološki prihvatljivija i sigurnija za korištenje, kao što su biljna ulja za kaljenje [5]. Biljna ulja su u pravilu manje toksična i lakša za zbrinjavanje nakon upotrebe.

Međutim, važno je napomenuti da svako sredstvo za gašenje ima svoje prednosti i nedostatke, te da je potrebno pronaći najbolju opciju za svaku specifičnu toplinsku obradu. Također, pri odabiru sredstva za gašenje treba uzeti u obzir i druge čimbenike, poput sigurnosti ljudi i opreme, kao i ekonomsku isplativost.

### **3.3. Nedostatci biljnih ulja za kaljenje**

Nedostatci biljnih ulja u postupku kaljenja očituju se u nepovoljnoj viskoznosti biljnih ulja u usporedbi s konvencionalnih. Također, otpornost na koroziju predstavlja manu biljnih ulja u postupku kaljenja. S obzirom na to, sposobnost kaljenja u biljnim uljima je znatno sužena i puno ovisi o materijalu koji se kali. Malom otpornošću na koroziju znatno se smanjuje radni vijek biljnog uja za kaljenje, a s tim se smanjuje i njegova ekonomska isplativost.

## 4. FIZIKALNA I KEMIJSKA SVOJSTVA ULJA ZA KALJENJE

### 4.1. Viskoznost

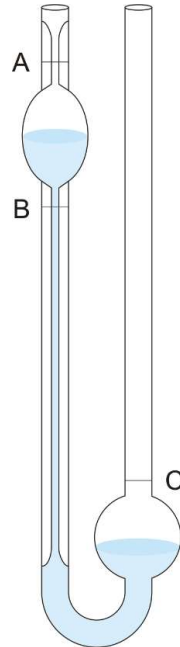
Viskoznost je najvažnije fizikalno svojstvo ulja za kaljenje. Viskoznost predstavlja mjeru unutrašnjeg trenja, koja djeluje kao otpor na promjenu položaja molekula tokom smičnog naprezanja [6]. Veličina unutrašnjeg trenja je u idealnom slučaju ovisna, osim o fluidu, o temperaturi  $T$  i tlaku  $p$ . Zbog izražene ovisnosti o temperaturi, kod svakog podatka o viskoznosti navodi se i temperatura na kojoj se ista mjerila. Za potrebe ovog rada izmjerene su viskoznosti uzoraka na temperaturama 40 °C i 100 °C. Također treba napomenuti da su prikazani rezultati kinematičke viskoznosti. Kinematička viskoznost je omjer dinamičke viskoznosti i gustoće, i predstavlja otpor protoka fluida na utjecaj gravitacije. Tokom laboratorijskog izvođenja pokusa za mjerenje kinematičke viskoznosti koriste se kapilarni viskozimetri. Pokus se općenito odvija na atmosferskom tlaku i temperaturama od 10 °C do 150 °C, a u radu će se prikazati vrijednosti za 40 °C i 100 °C.

S obzirom da se ulja za kaljenje podvrgavaju visokim temperaturama zagrijanog obratka i da u njima dolazi do promjene temperature treba obratiti pozornost na promjenu viskoznosti ovisno o temperaturi. Općenito u svim uljima, a tako i u uljima za kaljenje, svojstvo viskoznosti opada s povišenjem temperature. Poželjno svojstvo ulja za kaljenje bilo bi da se što više opire opadanju viskoznosti tokom povišenja temperature.

Promjena tlaka također utječe na viskoznost ulja za kaljenje. Povećanjem tlaka dolazi do stlačivanja ulja, te tako i do povećanja gustoće predmetnog ulja. Povećanje gustoće rezultirat će povišenjem dinamičke viskoznosti. S obzirom da su ulja za kaljenje prilikom gašenja opterećena jednakim (konstantnim) tlakom, na ovisnost o tlaku se neće previše obazirati u ovom radu.

Kapilarni viskozimetar je uređaj za mjerenje viskoziteta. Uvjet mjerenja viskoziteta na kapilarnom viskozimetru je poznavanje gustoće predmetne tekućine, u ovom slučaju ulja za kaljenje. Na uređaju dolazi do isticanja tekućine od točke A do točke B, te mjerenja vremena potrebnog za istjecanje.

Na slici 4 prikazana je skica kapilarnog viskozimetra



Slika 4. Skica kapilarnog viskozimetra [7]

Prije ispitivanja uzorka u uređaju se mjeri viskoznost poznatog uzorka, npr. destilirana voda, te se nakon toga uvrštavanjem svih parametara u jednadžbu dobivaju rezultati viskoziteta za predmet ispitivanja.

Jednadžba (1) pokazuje dobivanje dinamičke viskoznosti:

$$\eta_1 = \eta_2 \cdot \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2} \quad (1)$$

pri čemu su:

$\eta_1$  – dinamička viskoznost fluida koja se ispituje

$\eta_2$  – dinamička viskoznost fluida koja je poznata

$\rho_1$  – gustoća fluida koji se ispituje

$\rho_2$  – gustoća fluida koji je korišten za baždarenje

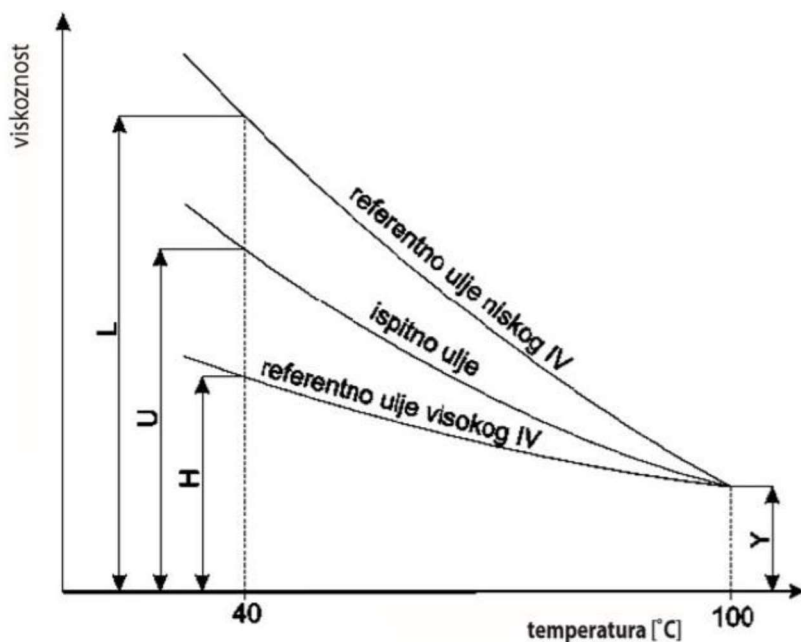
$t_1$  – vrijeme potrebno za istjecanje od točke A do točke B fluida koji se ispituje

$t_2$  – vrijeme potrebno za istjecanje od točke A do točke B fluida prilikom baždarenja.

Kapilarni viskozimetar može biti i ručni. Korištenjem ručnog kapilarnog viskozimetra mjeritelj sam stavlja ulje u kapilaru i sam mjeri vrijeme isticanja i prolaska kroz kapilaru. Korištenjem ručnog kapilarnog viskozimetra dobiva se direktno kinematička viskoznost koja se dobiva množenjem vremena isticanja i konstante kapilare.

#### 4.2. Indeks viskoznosti

Indeks viskoznosti je fizikalno svojstvo ulja za kaljenje i njegove viskoznosti u ovisnosti o temperaturi. Sustav određivanja indeksa viskoznosti temelji se na odabrana dva ulja sa što je većom mogućim različitim viskozno-temperaturnom ponašanjem [8]. Odabrana ulja različitu strukturu i mjeri im se viskoznost na 37,8 °C i 98,9 °C. Prvo ulje koje je odabrano ima većinsku naftensko-aromatsku strukturu te sva ulja njemu slična pokazuju visoku ovisnost viskoznosti o temperaturi. Za takva ulja se smatra da imaju indeks viskoznosti u iznosu 0 te su označena slovom L ("low") što označava nizak indeks viskoznosti. Drugo ulje odabrano ima većinsku parafinsku strukturu te pokazuje znatno manju ovisnost viskoznosti o temperaturi. Za takva ulja se smatra da imaju indeks viskoznosti 100 i označava ih se sa slovom H ("high") što označava visok indeks viskoznosti.



Slika 5. Ovisnost viskoznosti o temperaturi za određivanje indeksa viskoznosti

Indeks viskoznosti određuje se iz viskoznosti izmjerene na temperaturama od 40 °C i 100 °C. Te vrijednosti se potom uvrštavaju u jednadžbu (2) iz koje slijedi indeks viskoznosti u vrijednosti između 1 i 100:

$$IV = \frac{L - U}{L - H} \cdot 100 \quad (2)$$

gdje su:

$IV$  – indeks kinematičke viskoznosti u vrijednosti između 1 i 100

$L$  – iznos kinematičke viskoznosti referentnog ulja niskog indeksa viskoznosti na temperaturi od 40°C

$H$  - iznos kinematičke viskoznosti referentnog ulja visokog indeksa viskoznosti na temperaturi od 40°C

$U$  - iznos kinematičke viskoznosti ispitivanog ulja čiji se indeks viskoznosti ispituje

Indeks viskoznosti je pogodan podatak za brzu procjenu ovisnosti viskoziteta o temperaturi u nekom ulju.

### 4.3. Gustoća

Gustoća  $\rho$  je fizikalno svojstvo koje se opisuje omjerom mase  $m$  i volumena  $V$  neke tvari. Gustoća je jedno od bitnijih svojstava materijala iz razloga što dosta drugih fizikalnih i kemijskih svojstava ovise o njoj.

Jednadžbom (3) zadan je omjer za izračun gustoće

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Masa tvari se određuje metodom vaganja na preciznim vagama, kao npr. Mohrova vaga. Potom se za točno izmjerenu masu određuje volumen predmeta ili fluida. U slučaju ulja za kaljenje se radi o fluidu te se volumen može izmjeriti pomoću preciznih menzura ili mjernih posuda. Gustoća se može mjeriti i piknometrom. Mjerna jedinica za gustoću koja se najčešće koristi je  $\text{g/cm}^3$ . U današnje vrijeme se gustoća mjeri automatskim uređajima za mjerene gustoće, te se tako smanjuje ljudska pogreška na minimum.

Gustoća, kao i većina fizikalnih svojstava ulja za kaljenje, ovisi o temperaturi. Povećanjem temperature, gustoća opada. Zbog eksploatacijsko-tehničkih razloga, njene vrijednosti se najčešće izražavaju i računaju na 15 °C.

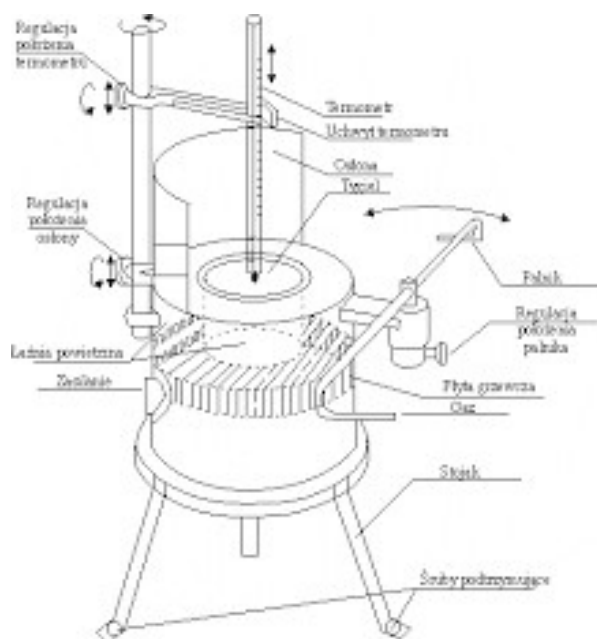
Za ulja za kaljenje bi idealno bilo da ulje što manje mijenja svoju gustoću promjenom temperature. Tako tokom ohlađivanja vrućeg obradka u ulju neće doći do velikih promjena svojstva gustoće, te tako posljedično i ostalih fizikalnih i kemijskih svojstava koja ovise o gustoći.

#### 4.4. Plamište

Plamište ili točka paljenja je fizikalno svojstvo ulja za kaljenje koje predstavlja temperaturu na kojoj dolazi do zapaljenja smjese ulja i zraka, a da nakon toga ne dolazi do daljnjeg gorenja [9]. Plamište je kontrolna veličina. Kod svježih ulja omogućava prepoznavanje nečistoća, a kod upotrebljivanih ulja služi za ustanovljavanje razrjeđenja ulja.

Mjerenje plamišta odvija se metodom koja se sastoji od zagrijavanja uzorka ulja u otvorenoj posudi, dok se iznad njega provodi plamen. Kada temperatura dosegne plamište, zapaljenje se javlja samo u kratkom trenutku kada se plamen primijeni, a zatim se gasi sam od sebe jer se temperatura iznad ulja spustila ispod plamišta.

Na slici 6 prikazana je skica metode po određivanju plamišta



Slika 6. Skica metode mjerenja plamišta



Plamište je važno fizikalno svojstvo jer ono može biti indikacija rizika od požara ili eksplozije ako se ulje koristi na mjestima gdje se pojavljuju izvori topline ili iskre. Stoga, ovo svojstvo se često navodi u tehničkim podacima maziva i drugih tekućina koje se koriste u industriji i drugim aplikacijama gdje je važno osigurati sigurnost.

#### **4.5. Točka tečenja**

Točka tečenja je fizikalno svojstvo ulja za kaljenje koje predstavlja temperaturu pri kojoj se materijal mijenja iz tekućeg u kruto stanje. Točka tečenja predstavlja temperaturu pri kojoj se ulje prestaje ponašati kao tekućina i postaje nepomična masa [10]. Ova temperatura se određuje tako što se ulje postepeno hladi, a zatim se promatra kada se prestaje teći. Kada ulje dostigne točku tečenja, ono će biti u obliku želatinozne mase koja se ne može teći.

Točka tečenja je važan parametar za ulja za kaljenje jer označava koliko dobro će ulje funkcionirati u hladnim uvjetima. Ako ulje ima nisku točku tečenja, tada će biti čvrsto i nepomično na hladnom, što može uzrokovati poteškoće u primjeni.

#### **4.6. Korozijska stabilnost**

Korozijska stabilnost ulja za kaljenje koje ukazuje na ponašanje ulja u prisustvu kisika, tj. na oksidacijsku stabilnost ulja za kaljenje. Tokom gašenja materijala u uljima, kroz neko vrijeme dolazi do izražaja prisustvo okolnog medija. Oksidacija još više dolazi do izražaja zbog rada na visokim temperaturama. Prilikom doticaja ulja sa zagrijanim obradkom tokom gašenja, obradak se katalitički ponaša te potom dolazi do starenja ulja. Tokom gašenja dolazi do oslobađanja spojeva koji direktno utječu na svojstva ulja za kaljenje, kao npr. viskoznost. Oksidacijska stabilnost se provodi u svrhu procjene kvalitete i vijeka ulja za kaljenje.

Oksidacijska stabilnost se može mjeriti u različitim medijima oksidacije, s različitim katalizatorima, na različitim temperaturama i različitim trajanjima ispitivanja. Prilikom odabira parametara ispitivanja treba voditi računa da uvjeti ispitivanja budu što sličniji uvjetima pri kojima će se ulje nalaziti u eksploataciji.

Za ispitivanje ulja za kaljenje koriste se metoda korozije na bakru. Kao katalizator u ispitivanju odabran je, kao što sam naziv metode kaže, bakar. Ulje se podvrgava ispitivanju u trajanju od 3 sata na temperaturi od 120 °C, a kao oksidacijsko sredstvo se koristi zrak. Nakon ispitivanja dolazi do promjene boje i strukture površine bakrene pločice te se onda vizualno određuje oksidacijska stabilnost usporedbom sa poznatim uzorcima određenim skalom.

#### 4.7. Bazni i kiseli broj

Ukupni bazni broj (TBN - Total Base Number) koristi kao mjerilo kapaciteta, ulja za kaljenje, za neutraliziranje kiselina. TBN se definira kao broj miligrama kalijevog hidroksida (KOH) koji je potreban da neutralizira sve kiseline u 1 gramu motornog ulja. TBN se obično izražava u jedinicama mg KOH/g [11].

TBN se koristi za procjenu životnog vijeka ulja i potrebe za zamjenom. Kako se ulje za kaljenje koristi tokom gašenja, kiseline koje se stvaraju kao nusproizvodi sagorijevanja mogu se nakupiti u ulju i smanjiti njegovu sposobnost ohlađivanja i općenito loše utjecati na njegova fizikalna i kemijska svojstva. TBN se smanjuje kako se kiseline nakupljaju u ulju. Za ocjenu istrošenosti ulja vrijednost baznog broja ne smije pasti ispod 50% vrijednosti svježeg ulja.

Kiseli broj je kemijsko svojstvo ulja za kaljenje koje predstavlja mjeru kiselosti fluida. Određuje se istim metodama kao bazni broj a izražava se u mgKOH/g uzorka. Kiseli broj je veličina koja nam pokazuje da li je u ulju uslijed oksidacije došlo do stvaranja kiselih produkata sagorijevanja.

Kiseli broj je važno svojstvo za ulja za kaljenje jer kiseline u ulju mogu uzrokovati koroziju i oštećenja metalnih dijelova koji se kaljenjem tretiraju u ulju. Visoka kiselost ulja također može smanjiti njegovu sposobnost podmazivanja, što može dovesti do većeg trošenja i kvara stroja. Stoga je važno pratiti kiseli broj ulja za kaljenje kako bi se osigurala optimalna funkcionalnost prilikom korištenja u procesu kaljenja. Ovaj broj se tokom rada povećava, a najveća dozvoljena vrijednost je 5.

#### 4.8. Isparljivost

Isparljivost predstavlja količinu fluida koja ispari u propisanom vremenu na propisanoj temperaturi. Isparljivost je važno svojstvo za mnoge tekuće tvari, uključujući i tekućine koje se koriste u motornim vozilima i industrijskim procesima, kao što je kaljenje.

Ovo svojstvo može biti važno za procjenu performansi i sigurnosti tekućine, kao i za određivanje njezine upotrebljivosti u različitim uvjetima.

Isparljivost se obično izražava kao maseni gubitak tekućine izražen u postotku po jedinici vremena ili kao brzina isparavanja u određenim uvjetima (npr. na temperaturi od 100 °C tijekom jednog sata). Mjerenje isparljivosti može biti važno za kontrolu procesa proizvodnje, sigurnost u radu, učinkovitost goriva, te za procjenu mogućih štetnih učinaka tvari na okoliš i ljudsko zdravlje.

Ispitivanje isparljivosti provodi se pomoću Noack testa. Tijekom Noack testa, uzorak tekućine se zagrijava na temperaturu od 250 °C u zatvorenom spremniku tijekom jednog sata. Tijekom tog vremena, tekućina isparava, a pare se skupljaju u kondenzatoru. Nakon jednog sata, spremnik se hladi kako bi se izmjerio maseni gubitak tekućine. Maseni gubitak predstavlja isparljivost uzorka tekućine.

#### 4.9. IR analiza

IR analiza (IR spektroskopija) je tehnika analize kojom se može odrediti sastav i struktura molekula na temelju njihove interakcije s infracrvenim zrakama. Infracrveni spektar je graf koji pokazuje apsorpciju infracrvenog zračenja prema valnoj duljini, a dobiva se prolaskom infracrvenih zraka kroz uzorak [12]. Infracrvena spektroskopija se provodi zrakama valnih duljina od 450 do 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

Svaka molekula apsorbira infracrveno zračenje na specifičnim valnim duljinama, ovisno o vrsti i položaju funkcionalnih skupina u molekuli. IR spektroskopija se može koristiti za identifikaciju molekula, kvantitativnu analizu sastava uzoraka i za praćenje kemijskih reakcija.

IR spektroskopija se koristi u mnogim područjima, uključujući kemijsku, farmaceutsku, prehrambenu, polimernu, forenzičku znanost te znanost o materijalima. U kemijskoj industriji, IR analiza se često koristi za karakterizaciju kemijskih spojeva, praćenje kemijskih

procesa i kontrolu kvalitete proizvoda. Tokom procesa kaljenja je također bitna IR analiza jer zagrijavanjem i hlađenjem ulja u njemu dolazi do kemijskih reakcija koje mogu utjecati na svojstva gašenja tokom postupka kaljenja. Stoga se IR analizom može određivati kvaliteta ulja i njegova pogodnost za daljnji rad.

#### **4.10. Izgled i boja**

Izgled, odnosno boja je fizikalno svojstvo ulja za kaljenje na temelju kojeg se može procijeniti sposobnost ulja za daljnji rad. Ulja za kaljenje, kao i sve drugo u industriji, imaju svoj vijek trajanja. Promjena boje ulja nakon korištenja u procesu gašenja može ukazivati na upitnost daljnjeg korištenja.

Svježe ulje ne smije sadržavati čvrstu stranu materiju ili izdvojene aditive u većim količinama. Pojava zamućenja, ukoliko je izazvana izdvajanjem parafina ili tragova vode, ne predstavlja nikakvo značenje u praktičnoj primjeni i promjeni svojstava ulja.

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio u sklopu ovog završnog rada odrađen je u laboratoriju kontrole kvalitete, razvoja i tehničke primjene firme INA MAZIVA d.o.o. U sljedećim poglavljima opisan će se provedene metode karakterizacije fizikalnih i kemijskih svojstava ulja za kaljenje, prikazati uređaji za ispitivanje istih te analizirati rezultati dobiveni na ispitnim uzorcima ulja. Odabrani uzorci ispitivanih ulja su biljna jestiva ulja: maslinovo, repičino i kokosovo.

### 5.1. Metode karakterizacije fizikalnih i kemijskih svojstava ulja za kaljenje

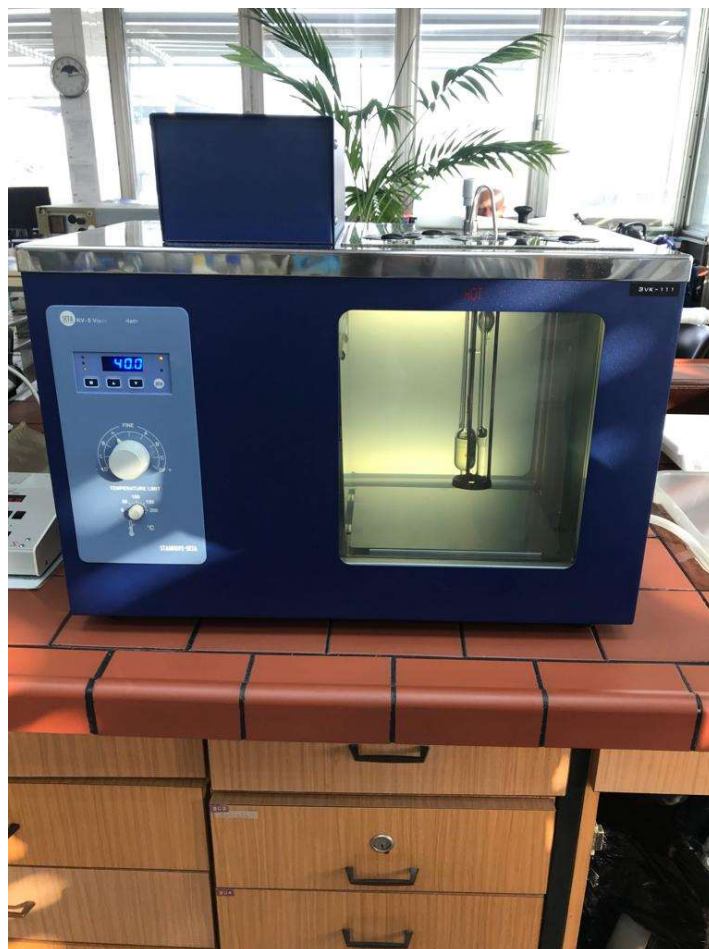
#### 5.1.1. Ispitivanje viskoznosti ulja

Viskoznost je fizikalno svojstvo ulja za kaljenje koje se mjeri kapilarnim viskozimetrom. Pri mjerenju viskoznosti ulja za kaljenje, obično se koristi ručni kapilarni viskozimetar. Kapilarni viskozimetar se sastoji od kapilare s otvorom na jednom kraju. Da bi se mjerila viskoznost ulja za kaljenje, kapilara se napuni određenom količinom tekućine, a zatim se zagrije na određenu temperaturu. Kada se kapilara zagrije, ventili se otvore, a tekućina počinje protjecati kroz kapilaru. Vrijeme koje je potrebno da tekućina prođe kroz kapilaru se mjeri.

Mjerenjem potrebnog vremena curenja ulja kroz kapilaru i množenjem sa konstantom kapilare dobiva se kinematička viskoznost.

Kinematička viskoznost se u pravilu, pa tako i u ovom radu, ispituje na temperaturama od 40 °C i 100 °C.

Na slici 7 prikazan je kapilarni viskozimetar laboratorija za kontrolu kvalitete, razvoja i tehničke primjene, INA MAZIVA d.o.o., koji se koristi za određivanje viskoznosti pri temperaturi od 40 °C.



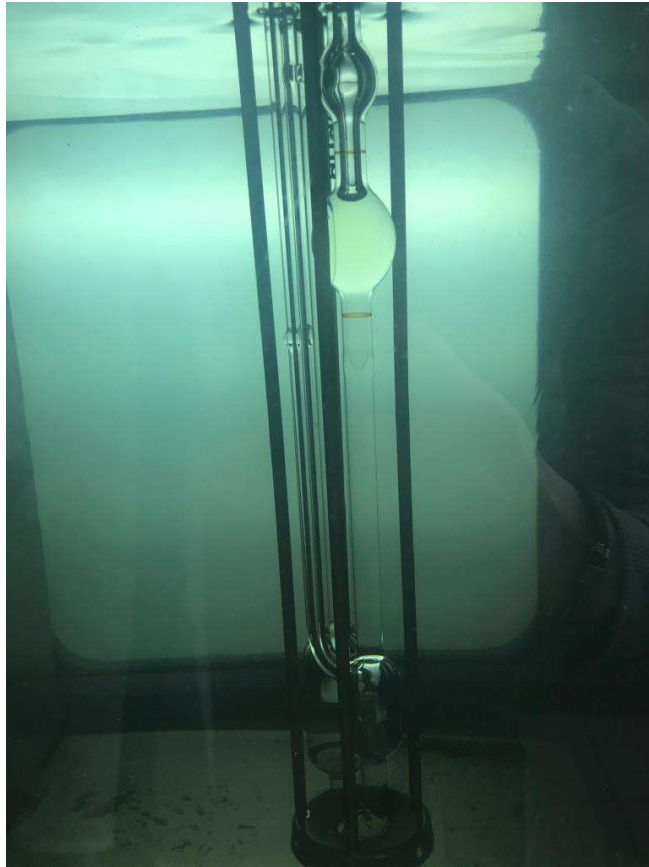
**Slika 7. Kapilarni viskozimetar korišten za mjerenje kinematičke viskoznosti pri 40°C**

Na slici 8 prikazan je kapilarni viskozimetar laboratorija za kontrolu kvalitete, razvoja i tehničke primjene, INA MAZIVA d.o.o., koji se koristi za određivanje viskoznosti pri temperaturi od 100 °C.



**Slika 8. Kapilarni viskozimetar za mjerenje kinematičke viskoznosti pri 100°C**

Na slici 9 prikazan je krupni plan kapilare unutar kapilarnog viskozimetra. Na njemu se može vidjeti oznake pri vrhu i dnu oblog dijela kapilare, što predstavlja početak i kraj mjerenja isticanja kroz kapilaru.



**Slika 9. Krupni plan kapilare unutar kapilarnog viskozimetra**

### **5.1.2. Ispitivanje gustoće ulja**

Gustoća se za potrebe ovog rada mjerila na automatskom aparatu za mjerenje gustoće. To je naprednija tehnologija od mjerenja zasebno mase i volumena i ručnog računanja gustoće stavljanjem u omjer te dvije vrijednosti. U aparat se stavlja relativno mala količina ulja, cca 10 mL, potom se uređaj zatvara i kroz par sekundi automatski izbacuje rezultat gustoće pri temperaturi od 15 °C.

Na slici 10 prikazan je automatski uređaj za određivanje gustoće fluida.





Slika 10. Automatski uređaj za određivanje gustoće

### 5.1.3. Mjerenje točke plamišta

Točka tečenja određuje se automatskim aparatom za određivanje plamišta. Ulje se unosi u uređaj te se, pošto je automatska metoda, uređaj upali i kroz par minuta dobivaju se rezultati mjerenja. Uređaj zagrijava ulje te zapaža temperaturu ulja pri zapaljenja para ulja. Može se obavljati i ručnom metodom kojom čovjek sam prislanja zapaljeni štapić te u trenutku zapaljenja očitava temperaturu.

Na slici 11 prikazan je automatski uređaj za mjerenje točke plamišta



Slika 11. Automatski uređaj za određivanje točke plamišta

#### 5.1.4. Mjerenje točke tečenja

Točka tečenja mjeri se automatskim uređajem za mjerenje točke tečenja. U uređaj se nalijeva relativno mala količina ulja, cca 5 mL. Na uređaju se potom odabire program ovisno o vrsti ulja koje se ispituje. U slučaju ulja za kaljenje, na uređaju se namješta program za formulirana ulja, s obzirom da ulja za kaljenje sadrže aditive. Uređaj kreće u rad i kroz pola sata automatski izbacuje vrijednost točke tečenja.

Na slici 12 prikazan je uređaj za automatsko određivanje točke tečenja.



Slika 12. Automatski uređaj za određivanje točke tečenja

#### 5.1.5. *Određivanje korozije na bakru*

Korozija na bakru opisuje otpornost ulja za kaljenje prema oksidaciji. Postupak se odvija tako da se u staklenu epruvetu nalijeva uzorak ulja za kaljenje te se u istu epruvetu stavlja bakrena pločica (prethodno dobro očišćena). Potom se epruveta s uljem i pločicom stavlja u uređaj koji oponaša uvjete eksploatacije. Uređaj grije epruvetu s uljem i pločicom na temperaturu od 120 °C.

Slika 13 prikazuje uređaj u kojem se nalazi epruveta tokom ispitivanja na oksidacijsku otpornost ulja za kaljenje.



**Slika 13. Uređaj za ispitivanje oksidacijske otpornosti ulja za kaljenje**

Poslije 3 sata što je uzorak proveo u uređaju, epruveta se vadi i promatraju se promjene na bakrenoj pločici. Bakrena pločica mijenja boju a ovisno kako je promijenila boju donose se zaključci o oksidacijski stabilnosti ulja. Boja sa ispitivane pločice uspoređuje se sa spektrom boja na ASTM ljestvici te se tako određuje razred otpornosti na oksidaciju.

Na slici 14 prikazana je ASTM ljestvica koja služi za usporedbu promjene boje bakrene pločice te određivanje razreda oksidacijske otpornosti.



Slika 14. ASTM ljestvica

### 5.1.6. *Određivanje baznog i kiselinskog broja*

Postupak određivanja baznog i kiselinskog broja određuje se procesom titracije. Titracija je analitička metoda koja se koristi za određivanje koncentracije nepoznatog spoja u otopini. Ova metoda se obično provodi dodavanjem standardne otopine (također poznate kao titrant) u nepoznatu otopinu uz miješanje dok se ne postigne određena reakcija. Tijekom titracije se prati reakcija pomoću indikatora, pH metara ili drugih metoda kako bi se odredio trenutak kada je reakcija dovršena. Na taj način se može izračunati koncentracija nepoznatog spoja u otopini, na temelju poznate koncentracije titranta i volumena potrebnog za dovršetak reakcije. Na temelju utroška titracijskog sredstva poslije se izračunavaju bazni i kiselinski broj.

### 5.1.7. Ispitivanje isparljivosti – Noack test

Noack test je standardizirana laboratorijska metoda koja se koristi za procjenu isparljivosti motornog ulja pri visokim temperaturama. Uzorak se ulijeva u automatski uređaj za određivanje isparavanja Noack testom. U uređaju se uzorak motornog ulja zagrijava do temperature od 250 °C tijekom perioda od jednog sata, dok se količina isparljivih komponenti motornog ulja mjeri. Količina isparljivih komponenti izražena je kao gubitak mase u postotku, a što je manji gubitak mase, to je veća otpornost motornog ulja na isparavanje pri visokim temperaturama. Uređaj je automatski i pri završetku ispitivanja sam izbacuje rezultat.

Na slici 15 prikazan je automatski uređaj za mjerenje svojstva isparavanja



Slika 15. Automatski uređaj za određivanje svojstva isparavanja Noack testom

### 5.1.8. IR fotospektrometrija

IR analiza je metoda određivanja infracrvenog spektra ulja za kaljenje. Provodi se u IR fotospektrometru. Uzorak se stavlja na ćeliju, koja se postavlja u fotospektrometar. Uzorak se podvrgava infracrvenim valovima valne duljine od 450 do 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Kao rezultat se dobiva IR spektar uzorka prikazan grafički. Prema obliku grafa se zaključuje o kemijskom sastavu ulja za kaljenje.

Na slici 16 prikazan je IR fotospektrometar.



Slika 16. IR fotospektrometar

### 5.2. Rezultati ispitivanja

U ovom poglavlju navest će se rezultati ispitivanja na prethodno objašnjenim metodama predmetnog uzorka. Uzorak predstavljaju biljna jestiva ulja: maslinovo ulje, kokosovo ulje i repičino ulje.

### 5.2.1. Rezultati ispitivanja viskoznosti

Tablica 1 prikazuje kinematičku viskoznost uzorka na temperaturama od 40 °C i 100 °C, izražena u mm<sup>2</sup>/s.

**Tablica 1. Kinematička viskoznost na temperaturama od 40 °C i 100 °C**

|  | Maslinovo ulje | Kokosovo ulje | Repičino ulje |
|--|----------------|---------------|---------------|
| <b>Kinematička viskoznost pri 40 °C</b>  | 38,72          | 29,97         | 33,88         |
| <b>Kinematička viskoznost pri 100 °C</b> | 8,383          | 5,981         | 8,152         |

### 5.2.2. Vrijednosti indeksa viskoznosti

Tablica 2 prikazuje rezultate ispitivanja indeksa viskoznosti uzorka.

**Tablica 2. Indeks viskoznosti**

|                           | Maslinovo ulje | Kokosovo ulje | Repičino ulje |
|---------------------------|----------------|---------------|---------------|
| <b>Indeks viskoznosti</b> | 201            | 168           | 212           |

### 5.2.3. Rezultati ispitivanja gustoće

Tablica 3 prikazuje rezultate ispitivanja gustoće uzorka pri temperaturi od 15 °C, izražene u g/cm<sup>3</sup>.

**Tablica 3. Rezultati ispitivanja gustoće**

|                          | Maslinovo ulje | Kokosovo ulje | Repičino ulje |
|--------------------------|----------------|---------------|---------------|
| <b>Gustoća pri 15 °C</b> | 0,9151         | 0,9253        | 0,9204        |

### 5.2.4. Rezultati određivanja točke tečenja

Tablica 4 prikazuje rezultate ispitivanja točke tečenja. Rezultati su izraženi u °C.

**Tablica 4. Rezultati ispitivanja točke tečenja**

|                      | Maslinovo ulje | Kokosovo ulje | Repičino ulje |
|----------------------|----------------|---------------|---------------|
| <b>Točka tečenja</b> | -18            | 24            | -30           |



### 5.2.5. Rezultati određivanja točke plamišta

Tablica 5 prikazuje rezultate ispitivanja svojstva plamišta. Rezultati su izraženi u °C.

**Tablica 5. Rezultati ispitivanja plamišta**

|                       | Maslinovo ulje | Kokosovo ulje | Repičino ulje |
|-----------------------|----------------|---------------|---------------|
| <b>Točka plamišta</b> | 326            | 288           | 320           |

### 5.2.6. Rezultat ispitivanja korozivnosti na bakru

Ispitivanje korozivnosti na bakru pokazalo je da su sva 3 uzorka nakon ispitivanja ocijenjena sa 1a na ASTM-ovoj ljestvici.

### 5.2.7. Rezultati određivanja kiselinskog i baznog broja

Tablica 6 prikazuje rezultate ispitivanja baznog i kiselinskog broja. Rezultati su izraženi u mgKOH/g.

**Tablica 6. Rezultati ispitivanja baznog i kiselinskog broja**

|                        | Maslinovo ulje | Kokosovo ulje | Repičino ulje |
|------------------------|----------------|---------------|---------------|
| <b>Kiselinski broj</b> | 0,52           | 0,30          | 0,71          |
| <b>Bazni broj</b>      | 0,35           | 0,20          | 0,35          |

### 5.2.8. Rezultati ispitivanja gubitka isparavanja

Tablica 7 prikazuje rezultate ispitivanja na svojstvo isparavanja Noack testom. Rezultati su izraženi u %.

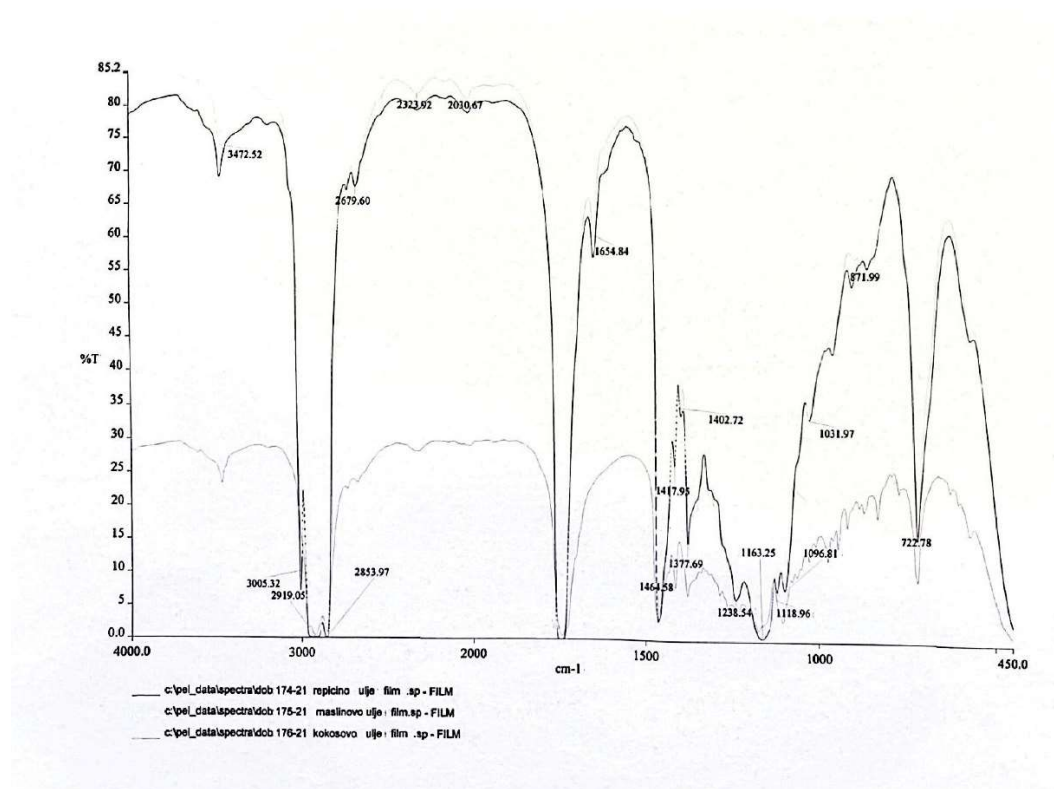
**Tablica 7. Rezultati Noack testa**

|                            | Maslinovo ulje | Kokosovo ulje | Repičino ulje |
|----------------------------|----------------|---------------|---------------|
| <b>Gubitak isparavanja</b> | 0,5            | 0,9           | 0,5           |

### 5.2.9. Rezultati ispitivanja IR fotospektrometrijom

Rezultati IR analize dobiveni su grafički. Ispisano je ponašanje ulja tokom prolaska vala valne duljine od 450 do 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

Slika 17 prikazuje rezultate ispitivanja IR analize. Kao rezultat dobiva se transmisija zračenja određene valne duljine.



Slika 17. Rezultati ispitivanja IR analizom

### 5.2.10. Rezultati karakterizacije izgleda i boje

Izgled i boja su fizikalna svojstva ulja za kaljenje koja se određuju vizualno. Promatranjem ulja zaključilo se da su maslinovo ulje i repičino ulje na sobnoj temperaturi bistro žute boje. Kokosovo ulje je na sobnoj temperaturi bijela mast.

## 6. ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju komentirat će se rezultati ispitivanja i usporediti s konvencionalnim uljem za kaljenje. Ulje korišteno za usporedbu rezultata je ulje za kaljenje proizvođača INA MAZIVA d.o.o.. Iz odjela Kontrola kvalitete, razvoja i tehničke primjene, predmetne tvrtke, uzeti su rezultati ispitivanja svojstava konvencionalnog ulja za kaljenje koja se spominju u ovom radu.

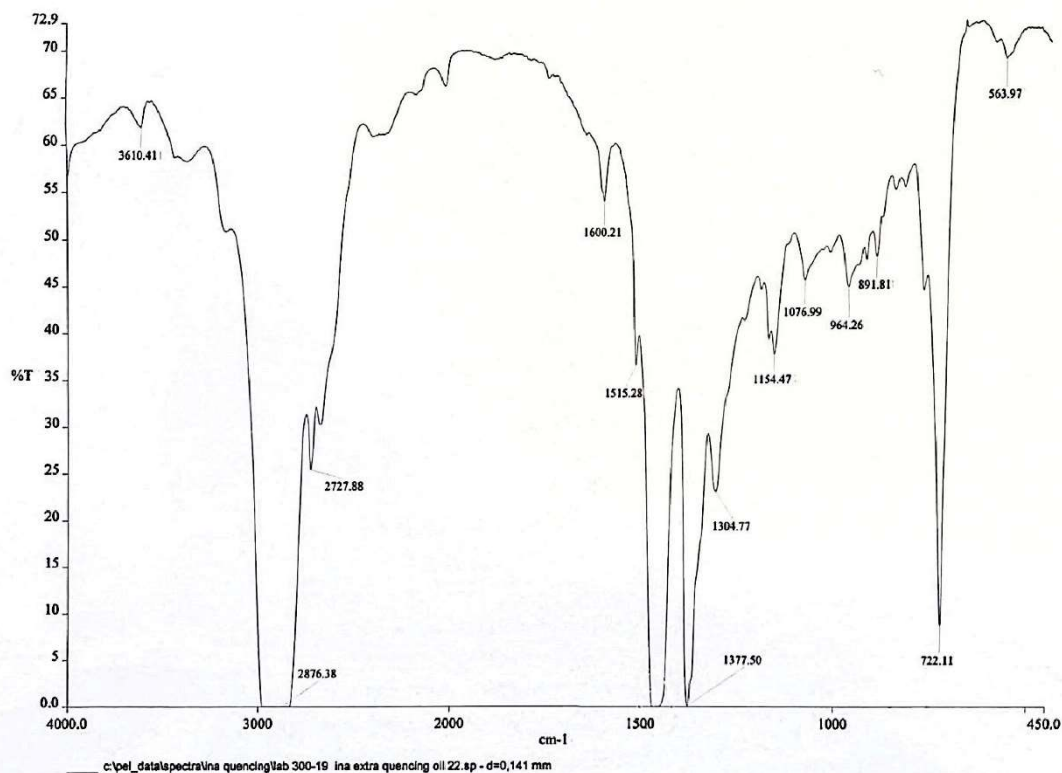
### 6.1. Rezultati ispitivanja svojstava konvencionalnog ulja za kaljenje

Tablica 8 prikazuje rezultate ispitivanja fizikalnih i kemijskih svojstava konvencionalnog ulja za kaljenje.

**Tablica 8. Fizikalna i kemijska svojstva konvencionalnog ulja za kaljenje**

| Svojstvo                                 | Mjerna jedinica    | Rezultat |
|--|--------------------|----------|
| <b>Kinematička viskoznost pri 40 °C</b>  | mm <sup>2</sup> /s | 23,91    |
| <b>Kinematička viskoznost pri 100 °C</b> | mm <sup>2</sup> /s | 4,99     |
| <b>Indeks viskoznosti</b>                |                    | 139      |
| <b>Gustoća pri 15 °C</b>                 | g/cm <sup>3</sup>  | 0,8323   |
| <b>Točka tečenja</b>                     | °C                 | -20      |
| <b>Plamište</b>                          | °C                 | 221      |
| <b>Korozija na bakru (100 °C, 3 h)</b>   |                    | 1b       |
| <b>Kiselinski broj</b>                   | mgKOH/g            | 0        |
| <b>Bazni broj</b>                        | mgKOH/g            | 1,90     |
| <b>Gubitak isparavanja – Noack test</b>  | %                  | 11,4     |

Slika 18 prikazuje Rezultate ispitivanja konvencionalnog ulja za kaljenje na IR fotospektrometru, IR analizom.



Slika 18. Rezultati IR analize konvencionalnog ulja za kaljenje

## 6.2. Usporedba rezultata

Viskoznost ulja za kaljenje trebao bi biti unutar određenih granica kako bi se osigurala optimalna raspodjela temperature i brzina hlađenja. Za različite postupke kaljenja i različite čelike odabiru se ulja različite viskoznosti. Uljima niske viskoznosti dolazi do najboljeg prijenosa topline i dobiva se brža brzina hlađenja. S obzirom da su predmet ovog rada ulja za kaljenje, brzina hlađenja mora bit veća od nadkritične brzine hlađenja, kako bi nastajala martenzitna faza u čeliku. Iz tog pogleda biljna ulja imaju nepovoljnu viskoznost u usporedbi s konvencionalnim uljem za kaljenje, te će stoga sporije ohlađivati predmet koji se kali.

Indeks viskoznosti predstavlja ovisnost kinematičke viskoznosti o temperaturi. Iz priloženih rezultata može se zaključiti da zadani uzorci biljnih ulja imaju veću ovisnost viskoznosti o temperaturi, što svakako nije povoljno kod postupka kaljenja. Kokosovo ulje ima vrijednost indeksa viskoznosti najbližu onom konvencionalnog ulja.

Gustoća je fizikalno svojstvo koje direktno utječe na druga fizikalna i kemijska svojstva ulja za kaljenje. Vrijednosti gustoće ispitanih uzoraka biljnih ulja su približno sličnih vrijednosti gustoće konvencionalnog ulja za kaljenje.

Točka tečenja predstavlja temperaturu na kojoj će ulje početi prelaziti iz tekuće u krutu fazu. Za ulja za kaljenje nepogodno svojstvo bi predstavljala visoka temperatura točke tečenja, jer bi direktno utjecala na funkcionalnost ulja na nižim temperaturama. Rezultati ispitivanja pokazali su da maslinovo i repičino ulje imaju povoljne točke tečenja, dapače repičino ulje ima temperaturu točke tečenja 10 °C nižu od temperature točke tečenja konvencionalnog ulja. Kokosovo ulje je s druge strane u krutom stanju pri temperaturama ispod 24 °C, što predstavlja lošu karakteristiku ulja za kaljenje jer nije primjenjivo za gašenje na sobnoj temperaturi.

Plamište ili točka paljenja je fizikalno svojstvo ulja za kaljenje koje predstavlja temperaturu na kojoj dolazi do zapaljenja smjese ulja i zraka, a da nakon toga ne dolazi do daljnjeg gorenja. Ovo je važno svojstvo u procesu kaljenja jer je postizanje odgovarajuće temperature plamišta ključno za osiguravanje sigurnosti procesa kaljenja. Ispitani uzorci biljnih ulja dali su bolje rezultate ispitivanja temperature plamišta od konvencionalnog ulja za kaljenje, što znači da će do paljenja smjese zraka i ulja dolaziti na višim temperaturama.

Korozija na bakru predstavlja oksidacijsku stabilnost ulja za kaljenje. Sva tri biljna ulja predmetnog uzorka neočekivano su pokazala manju osjetljivost prema oksidaciji u uvjetima ispitivanja. Pomoću ASTM ljestvice očitana je vrijednost 1a za sva ulja uzorka biljnih ulja, dok ulje za kaljenje ima približnu vrijednost tomu (1b).

Kod ulja za kaljenje, kiselinski i bazni broj su važna svojstva koja utječu na njihovu sposobnost zaštititi metala od oksidacije i korozije, te na učinkovitost procesa kaljenja. Vrijednosti baznog i kiselog broja predmetnih uzoraka biljnih ulja su između 0 i 1.

Konvencionalno ulje ima povoljnije vrijednosti baznog i kiselinskog broja (1,9 i 0). Naime visoki kiselinski broj i nizak bazni broj mogu dovesti do smanjenja učinkovitosti ulja za kaljenje i smanjenja trajnosti.

Isparljivost predstavlja količinu fluida koja ispari u propisanom vremenu na propisanoj temperaturi. Kako bi se osigurala sigurnost i funkcionalnost ulja za kaljenje, važno je pratiti isparljivost ulja, te odabrati ulje koje ima prihvatljivu razinu isparljivosti na sobnoj i povišenoj temperaturi. Isparljivost konvencionalnog ulja za kaljenje iznosi 11,4%, dok je za uzorak biljnih ulja ta brojka ispod 1%, što znači da predmetni uzorci biljnih ulja daju bolje rezultate ispitivanja Noack testom od konvencionalnog ulja za kaljenje.

IR spektroskopija se koristi za mjerenje apsorpcije infracrvenog zračenja koje prolazi kroz uzorak ulja. Različite molekule u ulju apsorbiraju svjetlost na različitim valnim duljinama, što omogućuje da se identificiraju i analiziraju sastojci i kemijske promjene u ulju. Kod rezultata ispitivanja konvencionalnog ulja za kaljenje možemo zamijetiti "peek" na valnoj duljini od 1600 do 1605  $\text{cm}^{-1}$ . Ta pojava je očekivana kod ulja za kaljenje i predstavlja količinu aromatskih spojeva u ulju. Za ulje za kaljenje je pogodno da taj "peek" bude što manji, tj. da ulje za kaljenje sadrži što manje aromatskih spojeva. Najveća razlika između uzorka biljnih ulja i konvencionalnog ulja za kaljenje je što iz svih rezultata IR spektroskopije biljnih ulja primjećujemo "peek" na valnoj duljini od 1750  $\text{cm}^{-1}$ . To ukazuje da su biljna ulja načinjena od estea. Uočavamo također da prirodna biljna ulja nemaju izražen "peek" na 1600-1605  $\text{cm}^{-1}$  te se može zaključiti da ne sadrže aromatske spojeve karakteristične za ulja za kaljenje.

## 7. ZAKLJUČAK

Fizikalna i kemijska svojstva ulja za kaljenje znatno će utjecati na brzinu i kvalitetu ohlađivanja obradka tokom postupka kaljenja. Ispitivani uzorci tri biljna ulja, maslinovog, kokosovog i repičinog, pokazali su rezultate ispitivanja fizikalnih i kemijskih svojstava slične onima konvencionalnog ulja za kaljenje.

Ispitivanje viskoznost uzorka koji je korišten za potrebe ovog rada dalo je rezultate znatno veće onima konvencionalnog ulja za kaljenje, što bi smanjilo brzinu ohlađivanja tokom postupka kaljenja. Također, ispitivanjem indeksa viskoznosti dobivene su vrijednosti veće od one konvencionalnog ulja, što znači da viskoznost biljnog ulja više ovisno o temperaturi. Ispitivanjem gustoće dobivene su vrijednosti slične onima konvencionalnog ulja. Ispitivanjem temperature plamišta dobivene su vrijednosti za 30 do 45 % veće u usporedbi sa konvencionalnim uljem za kaljenje, što predstavlja povoljniju vrijednost plamišta zbog veće otpornosti od zapaljenja pri povišenim temperaturama. Nadalje, točka tečenja za maslinovo i repičino ulje iznosi -18 i -30 °C što apsolutno zadovoljava potrebe za postupak kaljenja. Naprotiv tomu, kokosovo ulje se nalazi u krutom stanju na temperaturama ispod 24 °C, te tako nije moguće gašenje u njemu na sobnoj temperaturi. Ispitivanjima korozivnosti na bakru uzorak biljnih ulja je pokazao najvišu razinu otpornosti na oksidaciju u iznosu 1a, čak bolju od one konvencionalnog ulja za kaljenje koja iznosi 1b. Ispitivanjima dobiveni bazni i kiselinski broj uzorka biljnih ulja pokazali su lošije rezultate od onih konvencionalnog ulja i iz tog razloga postoji mogućnost od pojave korozije ili neželjenih spojeva. Ponašanje biljnih ulja tokom postupka Noack testa (ispitivanje na isparavanje) pokazalo je izvanredne rezultate, gdje je za sva 3 biljna ulja dobivena vrijednost manja od 1%. Za konvencionalno ulje za kaljenje ta vrijednost iznosi preko 11%. Ir analizom uzorka ukazivala je na pojavu estera, što je logično jer se radi o prirodnim biljnim uljima.

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja fizikalnih i kemijskih svojstava može se zaključiti da će, s obzirom na sličnost fizikalnih i kemijskih svojstava, biljna ulja biti pogodna za postupak kaljenja, odnosno za provođenje gašenja u njima. Međutim, treba napomenuti da se za potpuno točan zaključak oko korištenja biljnih ulja za industrijsku primjenu trebaju provesti daljnja ispitivanja nakon upotrebe istih te pratiti promjene fizikalnih i kemijskih svojstva s vremenom upotrebe.

## LITERATURA

- [1] D. Jurišić, “Ispitivanje sposobnosti ohlađivanja biljnih ulja za kaljenje,” info:eu-repo/semantics/masterThesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2021. Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:754082>
- [2] I. Martinez, “Ispitivanje sposobnosti ulja za kaljenje tijekom eksploatacije,” info:eu-repo/semantics/bachelorThesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2018. Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:885103>
- [3] H. Torkamani, Sh. Raygan, and J. Rassizadehghani, “Comparing microstructure and mechanical properties of AISI D2 steel after bright hardening and oil quenching,” *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 54, pp. 1049–1055, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.043.
- [4] J. Stanečić, “Usporedba sposobnosti ohlađivanja biljnih i mineralnih ulja za gašenje,” info:eu-repo/semantics/masterThesis, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2015. Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:709083>
- [5] R. Otero, J. Viscaino, J. Xu, J. Gu, G. Totten, and L. Canale, “Quenchant Cooling Curves, Rewetting, and Surface Heat Flux Properties of Vegetable Oils,” *Materials Performance and Characterization*, vol. 8, p. 20180042, May 2018, doi: 10.1520/MPC20180042.
- [6] F. Lenzi, G. Campana, A. Lopatriello, M. Mele, and A. Zanotti, “About the Use of mineral and vegetable Oils to improve the Sustainability of Steel Quenching,” *Procedia Manufacturing*, vol. 33, pp. 701–708, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.04.088.
- [7] “Ostwaldov viskozimetar @ Kemijski rječnik & glosar.” <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=Ostwaldov+viskozimetar> (accessed Feb. 26, 2023).
- [8] H. Méheust, J.-F. Le Meins, A. Brûlet, O. Sandre, E. Grau, and H. Cramail, “Fatty-acid based comb copolyesters as viscosity Index improvers in lubricants,” *European Polymer Journal*, vol. 181, p. 111674, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111674.
- [9] M. Gülüm and A. Bilgin, “Density, flash point and heating value variations of corn oil biodiesel–diesel fuel blends,” *Fuel Processing Technology*, vol. 134, pp. 456–464, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.fuproc.2015.02.026.
- [10] C. He *et al.*, “Modification of cottonseed oil with lipases and ionic liquid catalysts to prepare highly branched lubricant with low pour point and high viscosity,” *Biochemical Engineering Journal*, vol. 192, p. 108815, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.bej.2023.108815.
- [11] A. Almeida da Costa, J. Trivedi, J. Soares, P. Rocha, G. Costa, and M. Embiruçu, “An experimental evaluation of low salinity water mechanisms in a typical Brazilian sandstone and light crude oil with low acid/basic number,” *Fuel*, vol. 273, p. 117694, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117694.
- [12] R. Fernández-Varela *et al.*, “Screening the origin and weathering of oil slicks by attenuated total reflectance mid-IR spectrometry,” *Talanta*, vol. 68, no. 1, pp. 116–125, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.talanta.2005.04.061.



## **PRILOZI**

- I. CD-R disc