

# Usporedba sposobnosti ohlađivanja različitih sredstava za gašenje

---

Jakić, Marko

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:235:449454>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**Marko Jakić**

**USPOREDBA SPOSOBNOSTI OHLAĐIVANJA  
RAZLIČITIH SREDSTAVA ZA GAŠENJE**

**Završni rad**

**Zagreb, 2023.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević, dipl. ing.

Student:

Marko Jakić

Zagreb, 2023

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Zahvaljujem se mentoru Prof.dr.sc. Božidaru Matijeviću, Izabeli Martinez, mag. ing. stroj. i Filipu Žanetiću, mag. ing. stroj na pomoći tijekom izrade ovog završnog rada. Također zahvaljujem se o ostalim profesorima, asistentima, roditeljima ,prijateljima, djevojci i svima drugima koji su me podupirali i pomagali u toku pohađanja prijediplomskog studija Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Marko Jakić



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 Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Jakić**

JMBAG: **0035226026**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba sposobnosti ohlađivanja različitih sredstava za gašenje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of the cooling properties of different quenchants**

Opis zadatka:

Kaljenje je postupak toplinske obrade koji se široko primjenjuje u industriji sa svrhom povećanja tvrdoće čeličnih konstrukcijskih dijelova ili alata. Proces kaljenja sastoji se od početne faze ugrijavanja obratka na temperaturu austenitizacije, držanja na toj temperaturi te odgovarajućeg hlađenja na sobnu temperaturu kako bi se postigla martenzitna mikrostruktura. Da bi se smanjila opasnost od nastajanja napetosti, deformacija ili eventualnih pukotina obratka, jako je važan pravilan izbor odgovarajućeg medija, odnosno sredstva za ohlađivanje. U teorijskom dijelu rada potrebno je navesti i opisati različita sredstva za gašenje koja se primjenjuju u industriji te posebno istražiti mogućnost primjene biljnih ulja kao medija za ohlađivanje. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je primjenom standardizirane laboratorijske metode prema ISO 9950 snimiti krivulje hlađenja i odrediti karakteristike ohlađivanja za vodu te mineralno i biljno ulje te usporediti sposobnosti ohlađivanja ispitanih sredstava za gašenje. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć prilikom izrade rada.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zdao:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Datum predaje rada:

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

Predviđeni 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 .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. KALJENJE .....	2
2.1. Općenito o postupku kaljenja.....	2
2.2. Gašenje.....	3
2.3. Sredstva za gašenje .....	5
3. VODA KAO SREDSTVO ZA GAŠENJE.....	7
4. ULJE KAO SREDSTVO ZA GAŠENJE .....	8
4.1. Općenito o uljima.....	8
4.2. Proces gašenja u ulju.....	8
4.3. Bazna ulja.....	9
5. FIZIKALNA I KEMIJSKA SVOJSTVA ULJA ZA GAŠENJE .....	16
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	21
6.1. Opis ispitivanja sredstava za gašenje .....	21
6.2. Ispitivana sredstva.....	24
6.3. Rezultati ispitivanja.....	24
6.4. Analiza rezultata ispitivanja.....	30
7. ZAKLJUČAK.....	32
LITEARTURA.....	33
PRILOZI.....	35

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Prikaz postupka toplinske obrade materijala .....	2
Slika 2. Optimalne temperature austentizacije .....	3
Slika 3. Izotermički TTT dijagram podeutektoidnog ugljičnog čelika .....	4
Slika 4. Konstrukcija idealne krivulje gašenja .....	5
Slika 5. Faze ohlađivanja obratka .....	6
Slika 6. Raspored temperatura i brzine strujanja za gašenja prskanjem .....	7
Slika 7. Usporedba brzog i normalnog ulja za gašenje .....	9
Slika 8. Usporedba brzina gašenja mineralnog ulja za gašenje, konvencionalnog ulja za intezivno gašenje i ulja za gašenje posebnih svojstava .....	11
Slika 9. Usporedba brzine gašenja prije i nakon starenja .....	13
Slika 10. Utjecaj sadržaja vode na svijetlo ulje za gašenje .....	14
Slika 11. Viskoznost ulja za kaljenje kao funkcija vremena u upotrebi .....	17
Slika 12. Ovisnost viskoznosti o temperaturi za određivanje indeksa viskoznosti .....	18
Slika 13. Mjerni sustav IVF Smart Quench za ispitivanje .....	21
Slika 14. Shematski prikaz mjerne probe za ispitivanje krivulja .....	22
Slika 15. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja .....	25
Slika 16. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja(brzina ohlađivanja-temperatura) ispitnog uzorka sredstva za kaljenje oznake MINERALNO_ULJE _21 .....	26
Slika 17. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja(brzina ohlađivanja-temperatura) ispitnog uzorka sredstva za kaljenje oznake SINTETICKO_ULJE _21 .....	27
Slika 18. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja(brzina ohlađivanja-temperatura) ispitnog uzorka sredstva za kaljenje oznake PALMINO_ULJE _21 .....	28
Slika 19. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja(brzina ohlađivanja-temperatura) ispitnog uzorka sredstva za kaljenje oznake SUNCOKRETOVO_ULJE _21 .....	29
Slika 20. Prikaz svih sredstava za gašenje na jednom grafu .....	31

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Standardna svojstva biljnih ulja .....	15
Tablica 2. Popis korištenih oznaka s objašnjenjem.....	23
Tablica 3. Izmjereni parametri ohlađivanja za VODA_21 .....	25
Tablica 4. Izmjereni parametri ohlađivanja za MINERALNO_ULJE_21 .....	26
Tablica 5. Izmjereni parametri ohlađivanja za SINTETICKO_ULJE_21 .....	27
Tablica 6. Izmjereni parametri ohlađivanja za PALMINO_ULJE_21 .....	28
Tablica 7. Izmjereni parametri ohlađivanja za SUNCOKRETOVO_ULJE_21 .....	29



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
V	$cm^3$	volumen
m	kg	masa
$\vartheta$	$^{\circ}C$	temperatura
$\vartheta_a$	$^{\circ}C$	temperatura austenitizacije
H	$mm^2/s$	Iznos kinematičke viskoznosti referentnog ulja visokog indeksa viskoznosti na temperaturi od $40^{\circ}C$
$\rho$	$kg/m^3$	gustoća
$\alpha$	$m^2/s$	toplinska difuznost
A		austenit
A	$m^2$	površina
$A_p$		pothlađeni austenit
B		bainit
IV		Indeks viskoznosti
F		ferit
M		martenzit
P		perlit
L	$mm^2/s$	Iznos kinematičke viskoznosti referentnog ulja niskog indeksa viskoznosti na temperaturi od $40^{\circ}C$
T	K	apsolutna temperatura
$v_{kg}$	$^{\circ}C/s, K/s$	gornja kritična brzina gašenja
$v_{kd}$	$^{\circ}C/s, K/s$	donja kritična brzina gašenja

---

**SAŽETAK**

Postupak kaljenja je postupak toplinske obrade koji se provodi u svrhu povećanja mehaničkih svojstava materijala. Kaljenje je najpoznatiji postupak toplinske obrade koji se svakodnevno unaprjeđuje i poboljšava u svakom dijelu procesa. Postupak se sastoji od tri faze: grijanja do  $\vartheta_a$  (temperatura austenitizacije), zatim držanje na  $\vartheta_a$  i posljednje gašenje. U radu je potpuno obuhvaćen proces gašenja materijala, te je provedena usporedba različitih sredstava za gašenje. Odabir sredstava za gašenje je izuzetno bitan faktor u određivanju fizikalnih i ostalih svojstava, odabir pogrešnog sredstva za gašenje može uzrokovati nepopravljive posljedice kao što su: prevelika zaostala naprezanja, deformacije i u konačnici lom materijala. U ovom radu će se prikazati 5 različitih sredstava za gašenje, koja će se ispitivati na istom materijalu pri isti uvjetima, a rezultati će biti prikazani preko krivulja gašenja u grafovima. Cilj tada je prikazati karakteristike ispitivanih sredstava za gašenje i pokazati kada se koji može koristiti na kojim materijalima pri kojim uvjetima. U ispitivanju su korištene 4 vrste ulja za kaljenje i voda.

Ključne riječi: kaljenje, sredstva za gašenje, materijal, ulja, voda.

---

**SUMMARY**

The quenching process is a heat treatment procedure carried out for the purpose of increasing mechanical properties of the material. Tempering is the most famous heat treatment process that is improved and improved daily in every part of the process. The process consists of three phases: heating to,  $\mathcal{I}a$  (austentization temperature), then holding on to,  $\mathcal{I}a$ . and the last shutdown. The paper completely covers the process of extinguishing materials, and a comparison of different extinguishing agents was carried out. The selection of extinguishing agents is an extremely important factor in determining further physical and other properties, choosing the wrong extinguishing agent can cause irreparable consequences such as: too much residual stress, deformation and ultimately breakage of the material. This paper will show 5 different extinguishing agents, which will be tested on the same material under the same conditions, and the results will be shown through quenching curves in graphs. The aim is then to show the characteristics of the tested extinguishing agents and show when which can be used on which materials under what conditions. 4 types of tempering oil and water were used in the test.

Key words: quenching, extinguishing agents, material, oils, water.

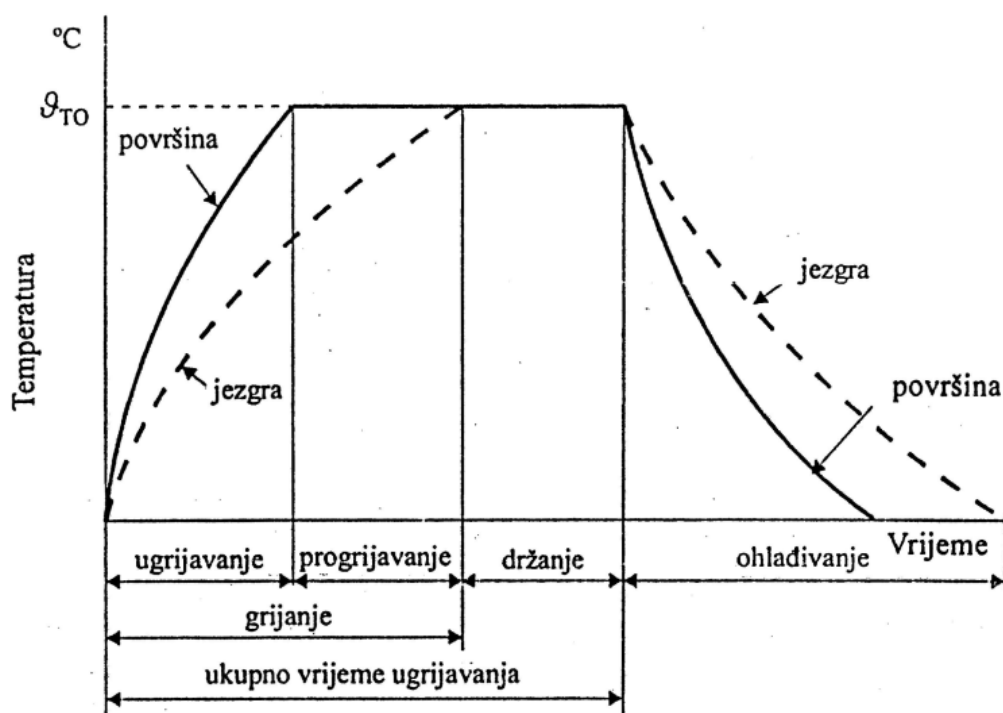
## 1. UVOD

Materijali i njihova primjena uvelike ovise o njihovim svojstvima, oduvijek je cilj bio postići što bolja svojstva materijala kako bi svi alati i predmeti koji bi se od njih izradili bili efikasniji i dugotrajniji. Puno je segmenata koji utječu na kvalitetu i svojstva materijala, a jedno od bitnijih je postupak kaljenja. Kaljenje je postupak toplinske obrade koji se široko primjenjuje u industriji sa svrhom povećavanja tvrdoće čeličnih konstrukcijskih dijelova i alata. Kaljenje je jedan od najbitnijih i najraširenijih postupaka toplinske obrade, a jedan od bitnijih dijelova jest način ohlađivanja te vrsta sredstva koje se koristi prilikom ohlađivanja materijala s temperature austentizacije. Odabir odgovarajućeg sredstva ohlađivanja će uvelike poboljšati kvalitetu i efikasnost alata, jer u slučaju lošeg odabira dolazi do stvaranja napetosti, deformacija i u najgorem slučaju površinskih pukotina. U ovom radu pozornost ćemo staviti na sredstva ohlađivanja materijala, točnije na posljednju fazu u procesu kaljenja. Faza gašenja austentiziranog čelika kritična je za postizanje traženih mehaničkih i triboloških svojstava u kaljenom stanju, ali istodobno u ovoj fazi nastaju i najveća zaostala naprezanja i najveća je opasnost od pojave pukotina. Stoga je izbor odgovarajućeg sredstva za gašenje i metode gašenja značajan korak u pripremi postupka kaljenja čelika. Obraditi ćemo 5 različitih vrsta sredstava za gašenje, te u eksperimentalnom dijelu pojedinačno prikazati krivulje gašenja i brzine ohlađivanja [1].

## 2. KALJENJE

### 2.1. Općenito o postupku kaljenja

Povijesno gledano ne može se odrediti točna godina kada su ljudi otkrili i definirali kaljenje, može se samo reći da je napretkom znanosti i ljudske inteligencije u 19. stoljeću postalo opće prihvaćeno. Kaljenje je jedan od najraširenijih i najvažnijih postupaka toplinske obrade materijala. Toplinska obradba je postupak u kojem se predmet namjerno podvrgava temperaturno- vremenskim ciklusima kako bi se postigla željena mikrostruktura a time i željena (mehanička, fizička, kemijska) svojstva. Kaljenje se sastoji od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i naglog gašenja pri čemu od austenita (mikrostrukturne faze s rešetkom  $\gamma$  -željeza) nastaje martenzit (mikrostrukturna faza s prostorno centriranom tetragonskom rešetkom).



Slika 1. Prikaz postupka toplinske obrade materijala [1]

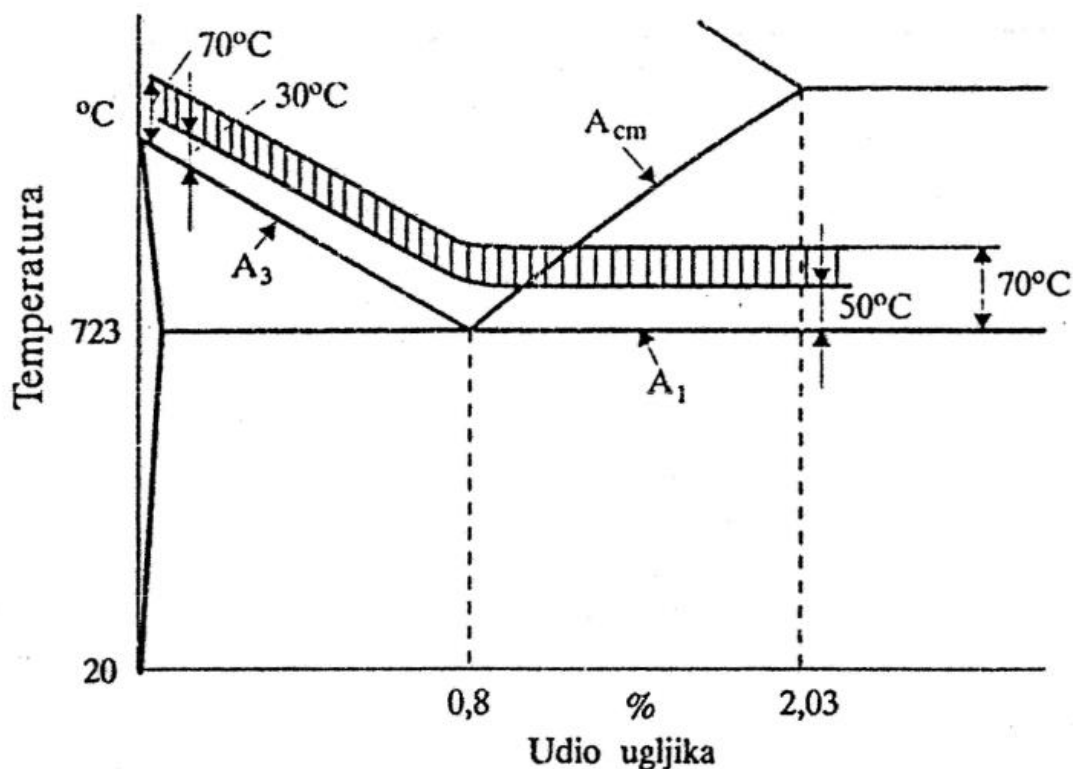
Iz slike 1. se jasno vidi da se kaljenjem temperatura jezgre i površine mijenja različitim brzinama i različitim brzinama dolaze do  $\vartheta_A$ , i zbog toga je potrebno imati fazu progrijavanja. Prilikom zagrijavanja materijala do temperature austenitizacije bitno je poštivati pravila o tome do koje temperature se materijala mora zagrijavati i koliko vremena. Austenitizacija je difuzijski proces koji se odvija na temperaturama većim od  $A_1$ .

a) Optimalna temperatura austenitizacije podeutektoidnih čelika ( $\%C < 0.8$ ) iznosi:

$$\vartheta_A = A_3 + (30 \dots 70^\circ\text{C}) \quad (1.1)$$

b) Optimalna temperatura austenitizacije nadeutektoidnih čelika ( $0.8 < \%C < 2.03$ ) iznosi:

$$\vartheta_A = A_1 + (50 \dots 70^\circ\text{C}) \quad (1.2)$$



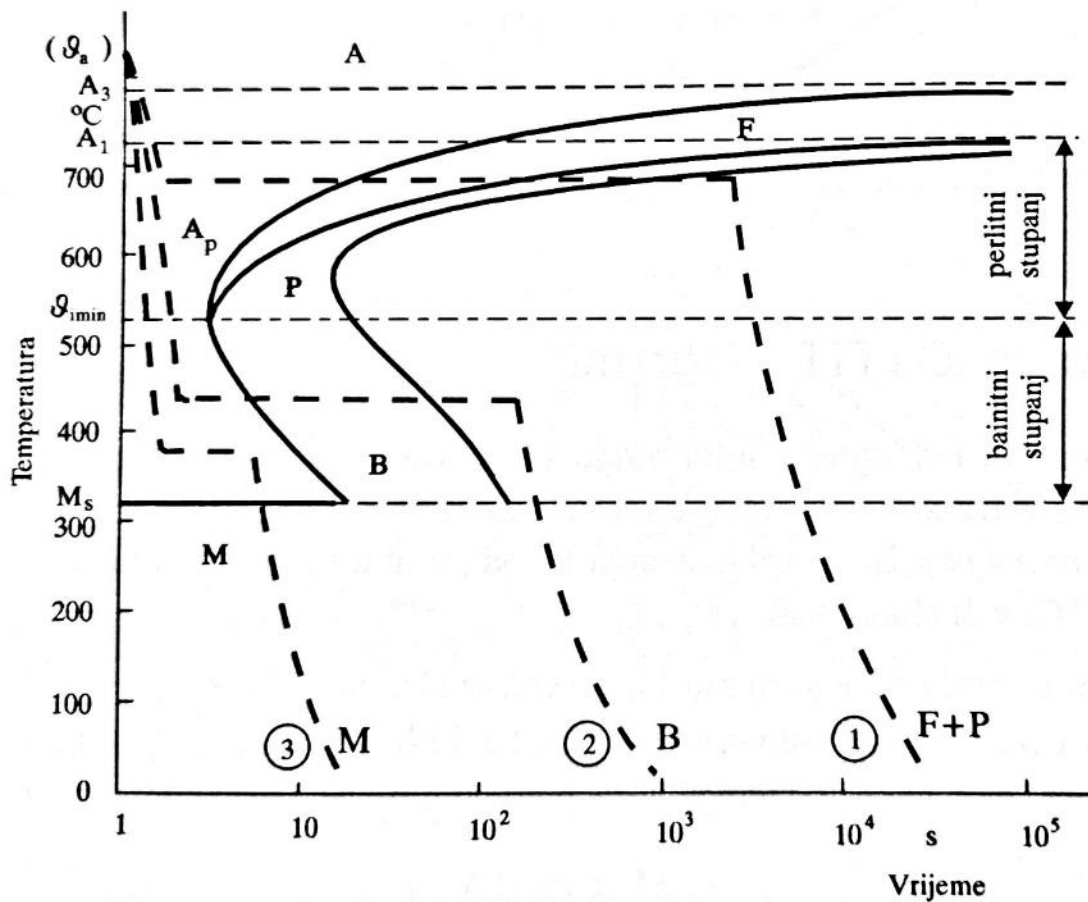
Slika 2. Optimalne temperature austenitizacije [2]

Iz slike 2. se jasno uočavaju razlike u  $\vartheta_A$ , između poudutektidnih i nadeutektoidnih čelika, ove temperature se moraju strogo poštivati kako ne bi došlo do ne željenih pojava u čelicima [2].

## 2.2. Gašenje

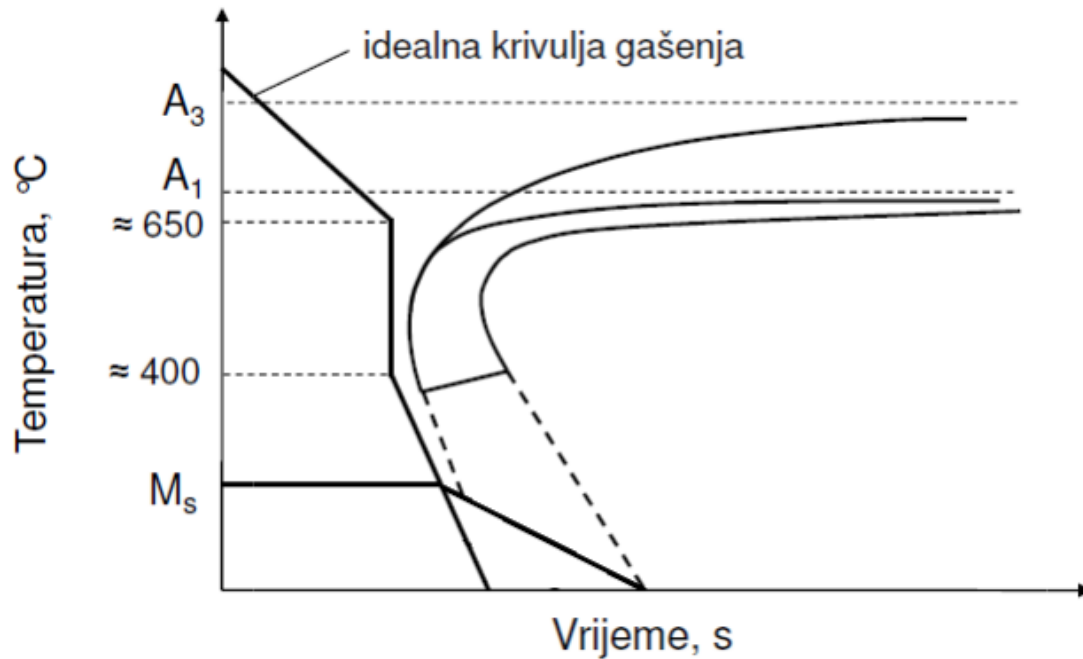
Faza gašenja austenitiziranog čelika kritična je za postizanje traženih mehaničkih i triboloških svojstava u kaljenom stanju, ali istodobno u ovoj fazi nastaju i najveća zaostala naprezanja i najveća je opasnost od pojave pukotina. Stoga je izbor odgovarajućeg sredstva za gašenje i metode gašenja značajan korak u pripremi postupka kaljenja čelika. Tijekom kaljenja pokušava se postići najmanja brzina hlađenja tijekom koje se ne bi ušlo u perlitnu ili baintnu fazu jer martenzit može nastati iz austenita, također najmanja brzina će dovesti i do najmanjeg količine zaostalih naprezanja i deformacija. Svaki materijal će imati zasebnu brzinu ohlađivanja koja će za njega biti idealna i koja će kasnije utjecati na njegova svojstva. Hlađenje materijala

s temperature austentizacije se najbolje opisiva TTT (Temperature – Time - Transformation) dijagramima [2].



Slika 3. Izotermički TTT dijagram podeutektoidnog ugljičnog čelika [2]

Na temelju slike 3. gdje vidimo TTT-dijagram pomoću kojeg možemo izraditi krivulju idealnog gašenja iz koje se mogu očitati karakteristične temperature i vremena gašenja kojima treba promijeniti brzinu hlađenja.



**Slika 4. Konstrukcija idealne krivulje gašenja [3]**

Slika 4. prikazuje idealnu krivulju gašenja kojoj bi trebala težiti sva sredstva za gašenje kako bi postigla sva najbolja moguća svojstva.

### 2.3. Sredstva za gašenje

Pri toplinskoj obradbi metala može se koristiti čitav niz različitih sredstava za hlađenje ili gašenje. Prema standardu ISO 6743-14, Heat treatment-U, ulja i slični proizvodi koji se primjenjuju u procesu kaljenja metala svrstani su u šest grupa i to:

H = ulja

A = voda i otopine polimera, emulzije

S = rastaljene soli

G = plinovi

F = fluidizirane kupke

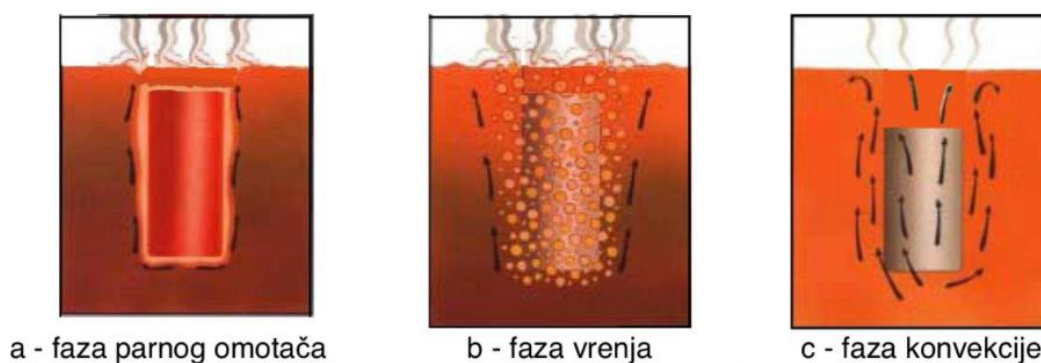
K = druga sredstva za gašenje.

Osnovna podjela navedenih sredstava za gašenje je prema stvaranju parnog omotača na početku uranjanja vrućeg obratka tzv. Leidenfrostovom fenomenu. Parni omotač nastaje kod sredstava s vrelištem ispod temperature austenizacije a to su voda, ulja te emulzije i polimeri. Sredstva koja ne podliježu Leidenfrostovom



fenomenu su sredstva s vrelištem iznad temperature austenitizacije čelika kao što

su rastaljene soli i rastaljeni metali, te plinovi i vakuum kao što su fluidizirane kupke, tehnički plinovi, mirni i komprimirani. Sredstva koja podliježu Leidenfrostovom fenomenu kod njih se stvara tzv. parni omotač (slika 5a), taj omotač izolira materijal od sredstva za gašenje, upravo taj omotač smanjiva brzinu ohlađivanja materijala te će ona u glavnini ovisiti o sredstvu za gašenje, kako se temperatura obratka smanjiva tako i parni omotač s vremenom nestaje te na taj način dolazi do kontakta sredstva za gašenje i obratka. Druga faza je faza vrenja prikazana na (slici 5b), kod nje imamo najbrže ohlađivanje. U trećoj fazi (slika 5c) temperatura obratka pada ispod temperature vrelišta sredstva za gašenje, a toplina se s obratka odvodi na sredstvo za gašenje isključivo konvekcijom. Ohlađivanje se u ovoj fazi može značajno povećati cirkulacijom izabranog sredstva za gašenje [4].

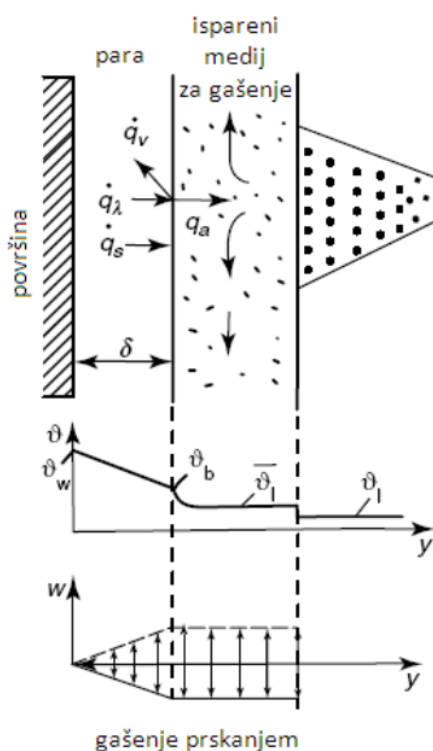


**Slika 5. Faze ohlađivanja obratka [4]**

Na slici 5. prikazane su faze ohlađivanja obratka koje su bitne zbog toga što sredstva za gašenje koja ćemo ispitivati u eksperimentalnom dijelu će imati sve ove 3 faze koje se nalaze na slici 5.

### 3. VODA KAO SREDSTVO ZA GAŠENJE

Voda kao sredstvo za gašenje spada u skupinu koja podliježe Leidenfrostovom fenomenu, vrelište im je ispod temperature austentizacije. Voda se u dosta slučajeva koristi kao otopine ili s uljima tzv. emulzije ili kao vodene otopine organskih i anorganskih tvari. Voda je najraširenije sredstvo za gašenje, upravo zbog svog toplinskog kapaciteta. Problem kod vode se javlja na temperaturama iznad  $50^{\circ}\text{C}$ , kada dolazi do stvaranja mjehurića na površini gašenog obratka koji djeluju kao izolator, zato se voda koja se koristi za gašenje stalno miješa kako bi temperatura na površini bila zadovoljavajuća. U praksi se voda primjenjuje tako što se prska na površinu, a dosta je u upotrebi i gašenje u slanoj vodi. Glavna prednost gašenja prskajućim mlazom vode je u tome što za razliku od gašenja uranjanjem u vodu je moguće kontrolirati prijenos topline kroz površinu tijekom gašenja. To se ostvaruje kontrolom količine prskanja fluida, što je moguće regulirati računalom. Nedostatak vode je također u tome što je uglavnom korisno samo za dio čelika, a za alatne i legirane čelike ne daje baš dobre rezultate [5].



**Slika 6. Raspored temperatura i brzine strujanja za gašenja prskanjem [5]**

Slikom 6. prikazan je način i brzina gašenja metodom prskanja na slikovit način medija koji prskajući hladi površinu, također je prikazana raspodjela brzine u fazama gašenja.

## 4. ULJE KAO SREDSTVO ZA GAŠENJE

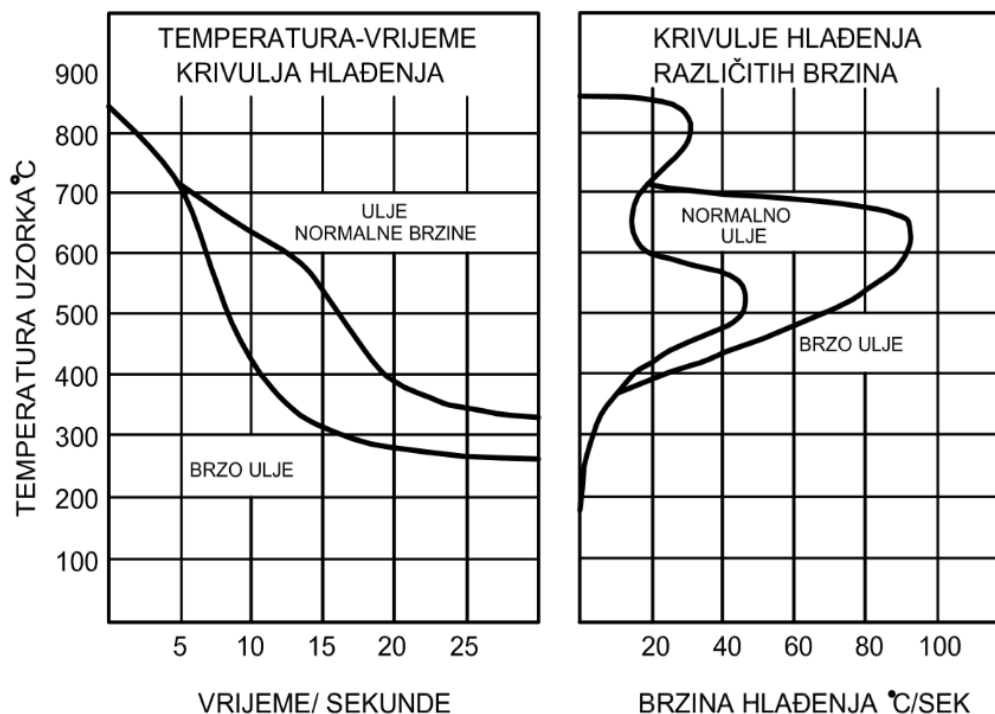
### 4.1. Općenito o uljima

Ulja su skupina neutralnih, lipofilnih i nepolarnih tekućina koje se ne miješaju s vodom. Sastavni su dio ljudske svakodnevnice i ljudi nemaju alternativu za njih, koriste se kao maziva, kao podloge za većinu ljudske prehrane i naravno kao i sredstvo za gašenje što je nama i najbitnije. Kemijskim sastavom pripadaju esterima. Ulja su se u industriji aktivno koristila do drugog svjetskog rata, gdje nakon toga dolazi do upotrebe jeftinijih, ali ekološki puno gorih opcija, ipak danas su ulja opet u uporabi što zbog svoje kvalitete, što zbog cijene i zbog svojih ekoloških prednosti, još jedna od karakteristika ulja je ta što mu je plamtište na 175°C, što je bitno svojstvo kod gašenja jer bi prevelik komad lako mogao prouzročiti požar.

### 4.2. Proces gašenja u ulju

Gašenje u ulju značajno je sporije od onoga u vodi pa je zato pogodno za čelike s gornjim kritičnim brzinama gašenja  $v_{kG} < 100$  gašenjem u ulju se smanjuju mogućnosti za veće dimenzijske deformacije te se smanjuje opasnost od pojave pukotina u odnosu na gašenje u vodi. Tipična postrojenja za gašenje u ulju imaju i sustave za pripremu ulja uobičajenim zagrijavanjem na 50 °C prije gašenja. Zagrijavanje je poželjno jer je pri sobnoj temperaturi cirkulacija i miješanje ulja teško, a ako se postupak gašenja odvija u hladnom ulju (engl. "slack quenching") postoji velika vjerojatnost pojave pukotina na obradcima i izbijanja požara u kupci. Kako bi se ulje ohladilo prolazi kroz izmjenjivač topline hlađen vodom. To je mjesto potrebno redovito nadzirati i pravilno održavati jer bi curenje vode u ulje za gašenje uzrokovalo jaka isparavanja koja predstavljaju rizik od požara. Ulje je hlapivo sredstvo koje može uzrokovati produljenje faze parnog omotača i pomaknuti početak mjehurastog vrenja (slika 5b.). Kod primjene ulja kao sredstva za gašenje potrebno je dijelove obratka nakon kaljenja oprati, što se može olakšati upotrebom različitih vrsta aditiva. U bazenima u kojima se ulje koristi kao sredstvo za gašenje se ne smije nalaziti voda u većim količinama, dok je u malim pri dnu spremnika prihvatljiva, dopuštena razina je oko 0.5%. Ulja se karakteriziraju kao srednje brza sredstva za gašenje. Ulja se osim na podrijetlo dijele i na brzinu gašenja gdje imamo niske, srednje i visoke brzine gašenja. Normalna ulja imaju nisku brzinu gašenja koja se koristi za obradu čeličnih legura gdje se maksimum mehaničkih svojstava može ostvariti malom brzinom gašenja. Ulja srednje brzine gašenja su miješana ulja koja imaju dovoljnu sposobnost da omoguće martenzitnu transformaciju. Ulja velike brzine gašenja imaju dodatna ubrzavajuća sredstva da bi se osigurala maksimalna brzina gašenja.

Kod ulja kao sredstva za gašenje vrlo je bitno ostvariti što kraću fazu parnog omotača, jer ta faza uvelike sprječava jednoliko ohlađivanja čitave površine obratka, a upravo to izrazito utječe na pojavu mehaničkih deformacija i zaostalih naprezanja[6].



Slika 7. Usporedba brzog i normalnog ulja za gašenje[6]

Na slici 7. prikazana su brza ulja i normalna ulja za gašenje, iz slike je jasno uočava razlika u brzini gašenja, a upravo ta brzina uvelike određuje i sva ostala svojstva materijala koji se gasi.

### 4.3. Bazna ulja

Ulja za kaljenje sastoje se od baznog ulja i aditiva. Bazno ulje može biti mineralno, sintetičko ili prirodno (biljno ili životinjsko), a najčešće se koriste mineralna bazna ulja. Aditivi imaju funkciju sprječavanja oksidacije, sprječavanja pjenjenja, poboljšanje čistoće obratka, poboljšanje brzine ohlađivanja i dr.

#### 4.3.1. Mineralna ulja

Mineralna ulja su u najširoj primjeni zbog bolje stabilnosti u odnosu na prirodna ulja ili zbog niže cijene u odnosu na sintetička ulja. Uglavnom se koriste mineralna ulja sa širokim rasponom indeksa viskoznosti. Mineralno bazno ulje proizvodi se rafinacijom teških frakcija nafte dobivenih vakuumskom destilacijom na temperaturi višoj od 350 °C i danas čini više od

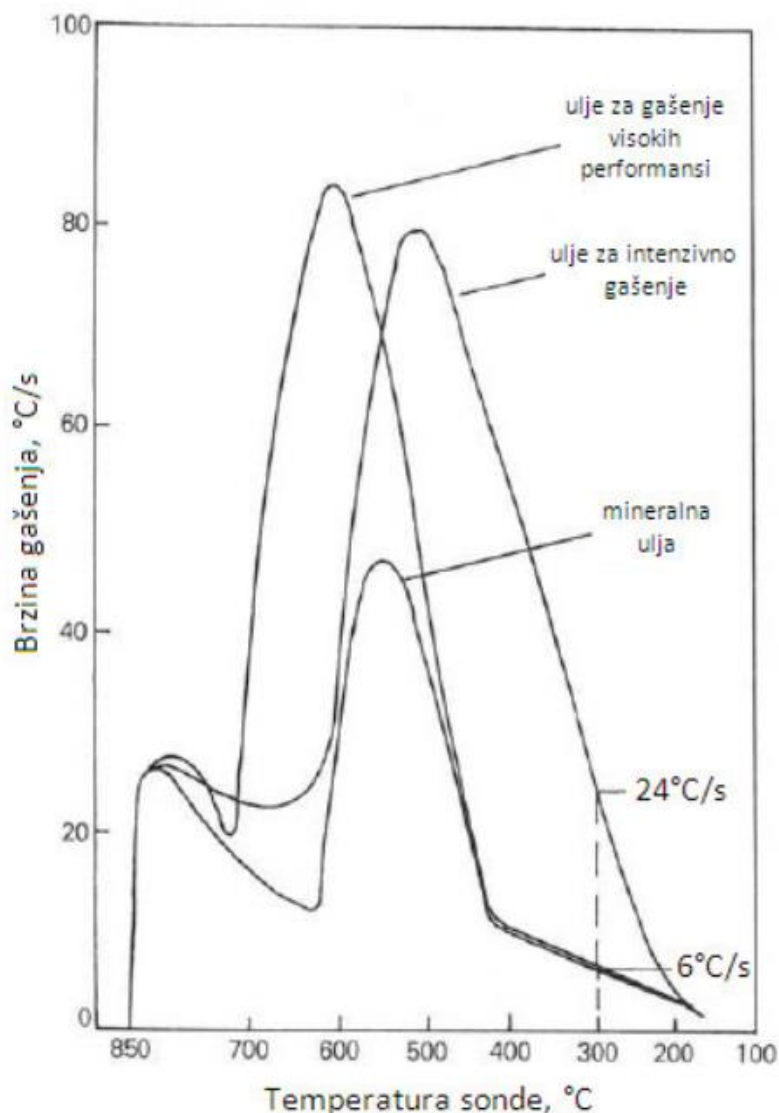
četiri petine od ukupno proizvedenih količina maziva. Maziva ulja mineralne osnove primjenjuju se za podmazivanje većine vozila i strojeva pri normalnim uvjetima rada. Dodacima ili aditivima se može smanjiti ovisnost viskoznosti o temperaturi, poboljšati tečnost pri niskim i postojanost pri višim temperaturama, povećati sposobnost zaštite od korozije, te čvrstoća mazivnog sloja i time poboljšati podnošenje iznimno velikih tlakova, te smanjiti trošenje strojnih dijelova.

#### 4.3.2 Sintetska ulja

Sintetska ulja su ulja koja se proizvode umjetnim putem, koristeći različite kemijske procese. Ova ulja su namjenski stvorena kako bi se postigle određene karakteristike i performanse koje često nadilaze svojstva konvencionalnih mineralnih ulja. Sintetska ulja mogu biti korisna u različitim aplikacijama, uključujući podmazivanje, termičku obradu metala i rashladne procese poput gašenja čelika. U kontekstu gašenja čelika, sintetska ulja mogu se koristiti kao rashladno sredstvo tijekom postupka gašenja. Ona imaju svojstva koja omogućuju brzo hlađenje čelika, što može rezultirati postizanjem željenih mehaničkih svojstava, kao što su tvrdoća i čvrstoća. Sintetska ulja obično imaju bolju stabilnost na visokim temperaturama i bolju otpornost na oksidaciju u usporedbi s konvencionalnim mineralnim uljima. To znači da se tijekom procesa gašenja mogu održavati stabilnija svojstva ulja, što može doprinijeti dosljednijim rezultatima u termičkoj obradi. Kao i kod bilo kojeg rashladnog sredstva, važno je odabrati odgovarajuće sintetičko ulje na temelju vrste čelika, postupka gašenja i željenih svojstava materijala[7].

Podjela sintetskih ulja:

- svijetla ulja za gašenje,
- ulja za intenzivno gašenje,
- ulja za izotermičko gašenje,
- biorazgradiva ulja,
- lako-ispariva ulja,
- ulja za gašenje u vakuumu.

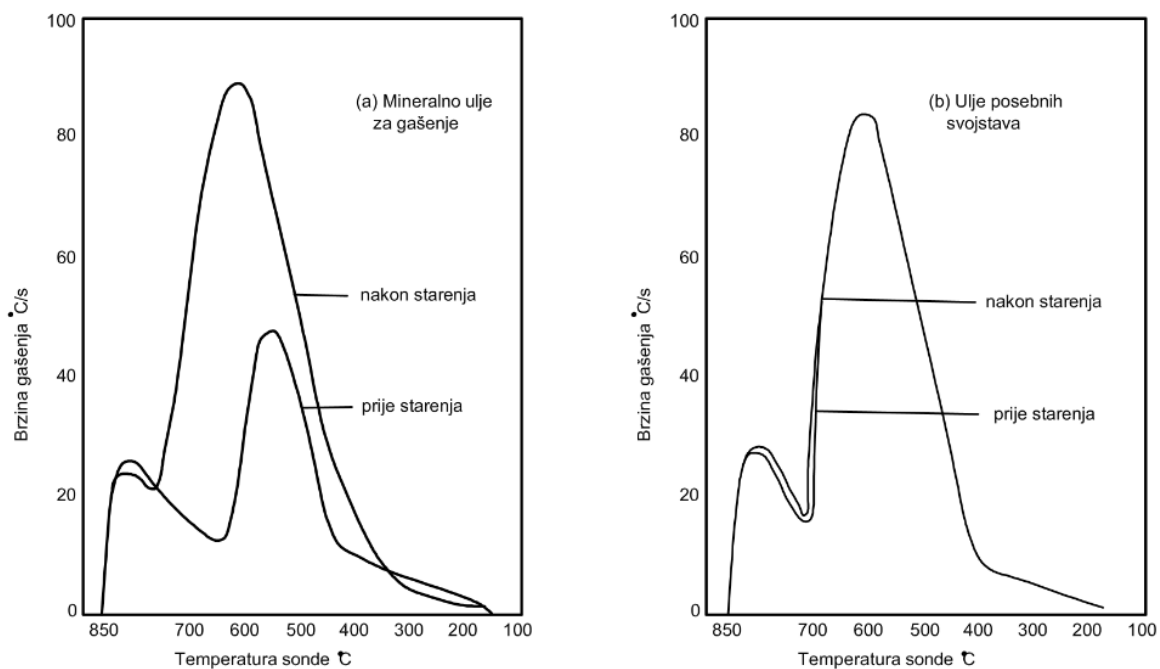


**Slika 8. Usporedba brzina gašenja mineralnog ulja za gašenje, konvencionalnog ulja za intenzivno gašenje i ulja za gašenje posebnih svojstava [7]**

- **Ulja za intenzivno gašenje** ističu se po vrlo kratkom trajanju faze parnog omotača, što ih stavlja u prednost u odnosu na većinu drugih ulja za gašenje. Ovo svojstvo ima ključnu ulogu u osiguravanju jednakomjernog hlađenja čitave površine obratka, što rezultira smanjenjem preostalih naprezanja i deformacija. Primjeri ovih ulja su komercijalno nazvani "ISOMAX" i "FASTQUENCH". Ova ulja omogućavaju postizanje duboke prokaljenosti čak i kod velikih komada obratka. Brzina gašenja ovih ulja ovisi o temperaturi i prikazana je na slici 8. [8]

- **Ulja za izotermičku obradu (HOT QUENCHING OILS)** spadaju u kategoriju sintetskih ulja za gašenje. Prva generacija ovih ulja imala je svojstva sporo hlađenje i nisku otpornost na oksidaciju, što je rezultiralo ograničenom primjenom. No, daljnjim unaprjeđenjima u brzini gašenja, kontroli deformacija i produženju vijeka trajanja, postignuta su značajno kvalitetnija ulja za gašenje koja osiguravaju optimalnu tvrdoću uz minimalne deformacije. [8]
- **Ulja za gašenje u vakuumu** sintetska su ulja za gašenje na koja se postavljaju sljedeći uvjeti: povišena otpornost na hlapljenje, mala apsorpcija plinova, brzo otplinjavanje, vrlo visok stupanj čistoće ulja. [8]
- **Svijetla ulja za gašenje** (poznata i kao "normal speed quenching oils") su ulja čija brzina gašenja isključivo ovisi o viskoznosti. S porastom viskoznosti, brzina hlađenja postaje sve manja. Ova ulja koriste se za procese poput otvrdnjavanja i popuštanja velikih komada legiranih čelika, gašenja šipki te otvrdnjavanja alatnog čelika. [8]
- **Lako-ispariva ulja za gašenje** sintetska su ulja koja sadrže specifične površinski aktivne spojeve kao što su radikali ili tenzidi. Ovi aditivi su dodani kako bi omogućili jednostavno ispiranje uljnog sloja vodom i lako uklanjanje preostalih uljnih ostataka u sljedećem koraku obrade. Ova vrsta ulja olakšava proces čišćenja i pripreme površina za nadolazeće faze obrade. [8]
- **Biorazgradiva ulja** (ulja bez mineralnih sastojaka) su ulja na bazi sintetičkih i/ili prirodnih sirovina. Ova ulja, često označena kao "ekološki prihvatljiva", imaju iznimno visoku točku paljenja i otpornost na isparavanje, iako imaju nisku viskoznost. Zanimljivo je da ta točka paljenja može biti veća od sličnih ulja koja se temelje na mineralnom ulju. Ova ulja su posebno pogodna za brze procese hlađenja koji su intenzivniji od onih koji koriste ulja na bazi mineralnog ulja. Također, lako se ispiraju vodom, olakšavajući postupak čišćenja. [8]

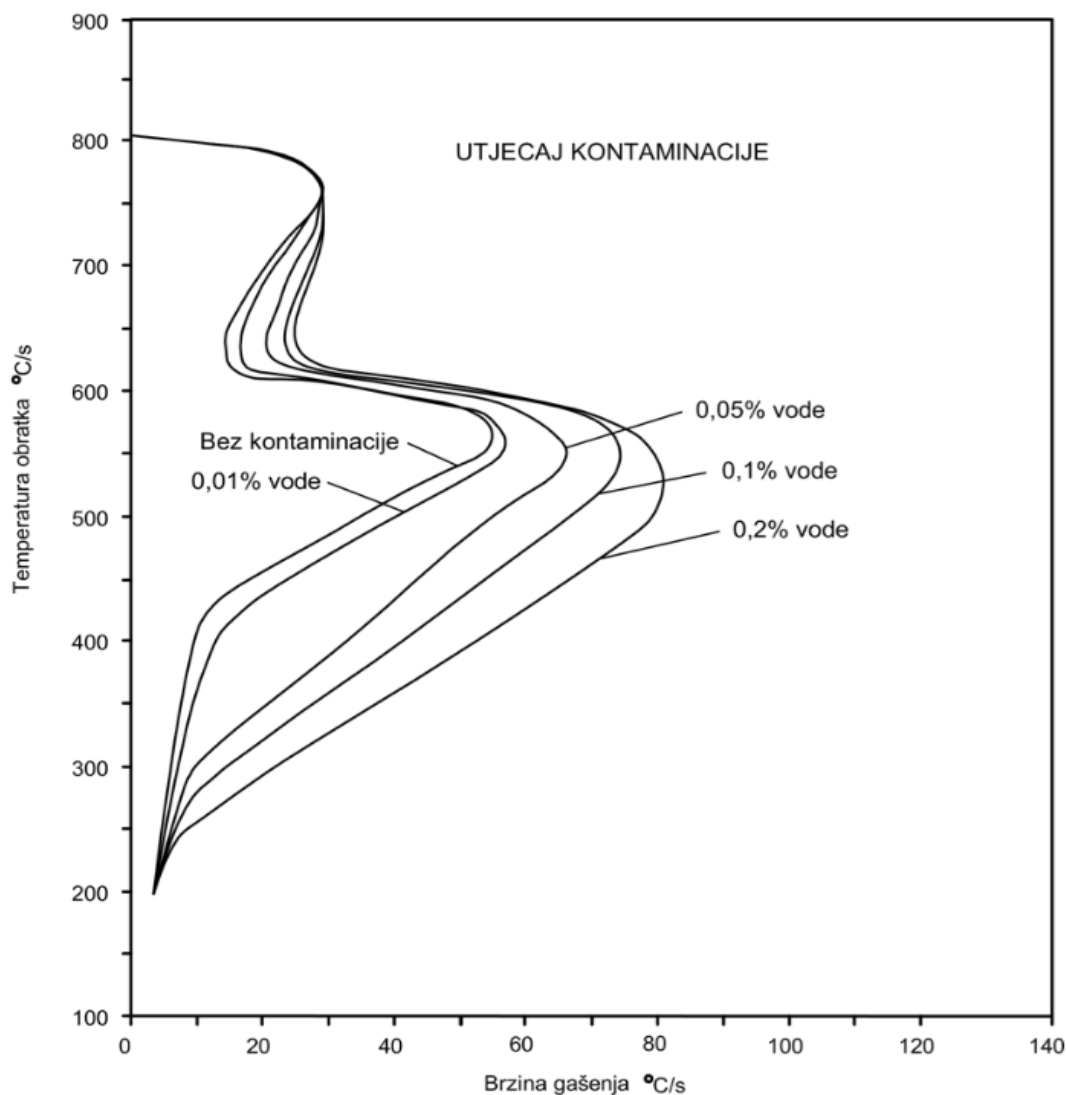
Ulja su podložna starenju, to je proces koji se događa svim uljima za gašenje pa tako i ovim opisanim uljima, starenje ulja definira potpunu promjenu karakteristika samoga ulja. Na slici 9. prikazane su ovisnosti brzine hlađenja o temperaturi mineralnog ulja i ulja posebnih svojstava. U ulja posebnih svojstava dodaju se aditivi za usporavanje starenja, što se uočava i iz mjerenja.



**Slika 9. Usporedba brzine gašenja prije i nakon starenja [9]**

Iz slike 9. se jasno uočava da je brzina gašenja kod mineralnih ulja zbog starenja povećala, dok je kod ulja posebnih svojstava zbog određenih aditivnih tvari koje su mu dodane brzina gašenja je ostala gotovo ista nakon istog perioda starenja kao i kod mineralnog ulja. Trajanje ulja za ohlađivanje također ovisi i o različitim kemijskim utjecajima koji utječu na njegovu gustoću (dopuštena promjena do 10%) baš zbog toga ulja za gašenje se tokom vremena zamjenjuju. Ulje za gašenje se može kontaminirati i zbog povećane koncentracije vode u njemu, čak i ne znatne količine vode mogu dovesti do stvaranja pukotina i ostalih mehančkih deformacija.





Slika 10. Utjecaj sadržaja vode na svijetlo ulje za gašenje[10]

### 4.3.3 Biljna ulja

Općenita upotreba biljnih (i životinjskih) ulja u industriji prestala je nakon drugog svjetskog rata. Međutim, došlo je do ponovnog oživljavanja interesa za ova ulja većinom iz ekoloških razloga. Većina isparljivih, tekućih sredstava za gašenje koja se koriste u industriji toplinske obrade temelji se na bazi naftnih ulja, za koje se ustanovilo da su toksična za okoliš te ih je često teško (i skupo) zbrinuti nakon upotrebe. Navedene spoznaje daju veliku prednost sredstvima na bazi biljnih ulja jer ona posjeduju znatno bolju biorazgradivost te ukoliko se ispuste u tlo i podzemne vode znatno su manje štetna, iako puno manje štetna i puno bolje razgradiva, tako se pokazalo da osiguravaju ujednačeniji prijenos topline zbog svog minimalnog vretnja, što je jako važno ako se želi minimizirati pojava deformacija, također biljna

ulja imaju svoje nedostatke koji ih onemogućuju da budu u puno većoj uporabi, a neki od nedostataka su: oksidacijska nestabilnost, nezadovoljavajuća viskoznost i slabija korozivna otpornost. Dijele se na: repičino, suncokretovo i palmino ulje [11].

**Tablica 1. Standardna svojstva biljnih ulja [11]**

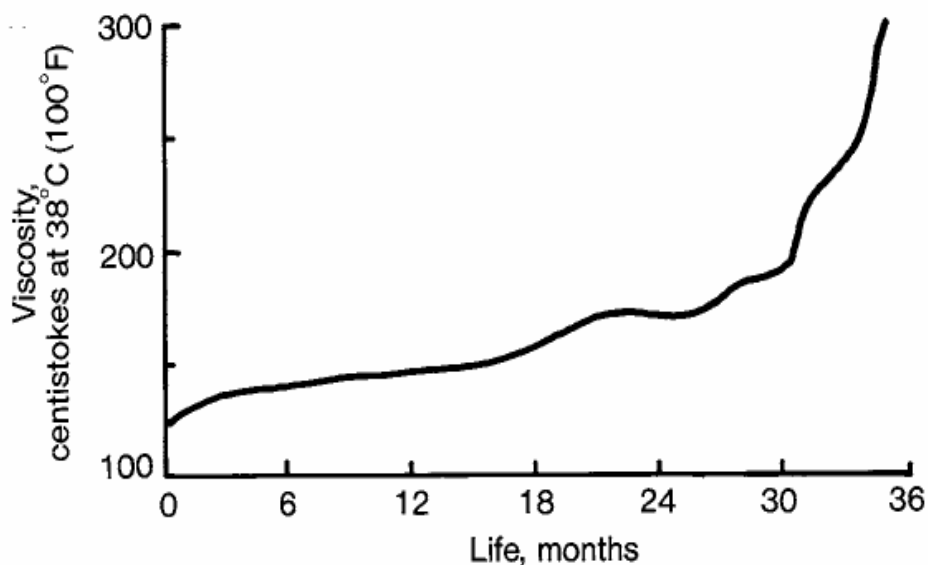
Ulje	Talište, °C	Vrelište, °C	Plamište, °C	Temperatura (vezana uz viskoznost), °C	Kinematička viskoznost, $10^{-6} m^2/s$
Repičino	24	238	335-338	50	77
Palmino	35	220	320	37,8	47,8
				54,4	26,4

Tablica 1. prikazuje standardna svojstva repičinog i palminog ulja koja će se daljnje ispitivati u eksperimentalnom dijelu ovog rada.

## 5. FIZIKALNA I KEMIJSKA SVOJSTVA ULJA ZA GAŠENJE

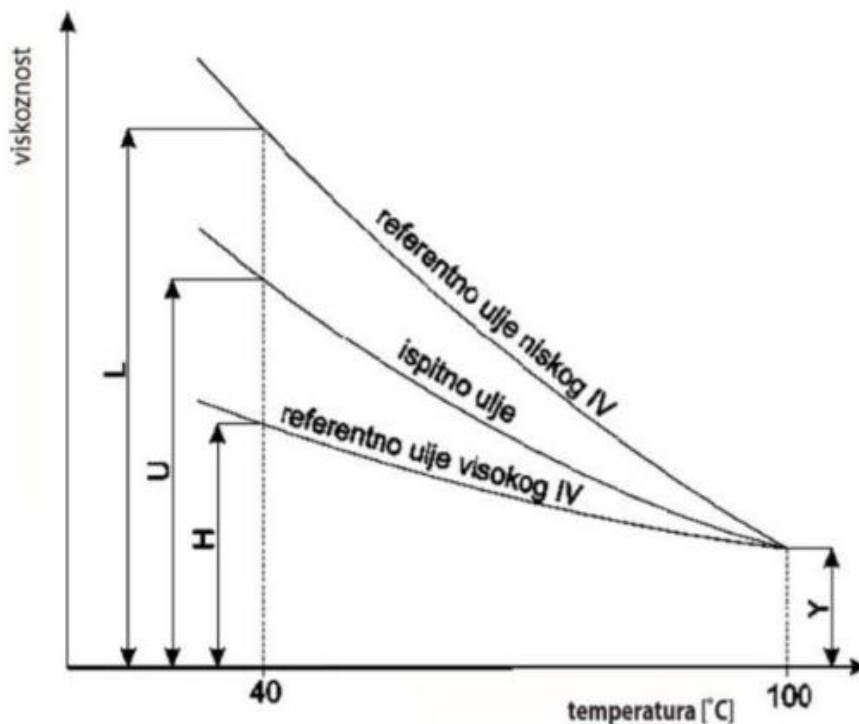
- 1) **Viskoznost** je fizička karakteristika tekućine koja opisuje njezinu unutarnju otpornost na pomicanje ili protok. U osnovi, viskoznost mjeri koliko tekućina pruža otpor protoku kroz nju kada se na nju primjenjuje sila. Kinematička viskoznost je omjer dinamičke viskoznosti i gustoće, i predstavlja otpor protoka fluida na utjecaj gravitacije. Tekućine s većom viskoznošću imaju veći otpor protoku i pomicanju, dok tekućine s manjom viskoznošću omogućuju lakši protok[12]. U kontekstu ulja za kaljenje ili podmazivanje, viskoznost igra ključnu ulogu u tome kako će ulje obavljati svoju funkciju, uključujući proces hlađenja, podmazivanja i smanjenja trenja. Kada je viskoznost ulja odgovarajuća za određenu primjenu, ulje će se pravilno ponašati i osigurati potrebnu zaštitu i učinkovitost. Međutim, previsoka viskoznost može rezultirati sporijim protokom i manjom sposobnošću hlađenja, dok premala viskoznost može dovesti do nedostatka podmazivanja i neadekvatne zaštite. Stoga je važno odabrati ulje s odgovarajućom viskoznošću za specifičnu primjenu kako bi se postigli optimalni rezultati. 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. Zbog razgradnje, viskoznost ulja se mijenja tijekom vremena. Ulja za kaljenje se tijekom svoje uporabe podvrgavaju visokim temperaturama, a napomenuli smo da viskoznost jako puno ovisi o temperaturi te je zbog toga vrlo bitno da sredstvo za gašenje ima što veću otpornost na djelovanje povišenih temperatura, točnije da viskoznost ne opada porastom temperature. Kapilarni viskozimetar je uređaj za mjerenje viskoziteta. U svrhu praćenja procesa i potencijalne potrebe za rješavanjem problema, tretman topline trebao bi razviti povijesni zapis

varijacija viskoznosti u svom spremniku, kao što je prikazano na grafikonu prikazanom na Slici 11.



Slika 11. Viskoznost ulja za kaljenje kao funkcija vremena u upotrebi [12].

- 2) **Indeks viskoznosti (IV)** je fizikalno svojstvo ulja za kaljenje koje mjeri njegovu viskoznost u odnosu na temperaturu. Postupak za određivanje indeksa viskoznosti uključuje upotrebu dva različita ulja s različitim viskozitetima pri različitim temperaturama [13]. Na slici 12. imamo dva odabrana ulja koja imaju različitu kemijsku strukturu i njihova viskoznost se mjeri pri temperaturama od 37,8 °C i 98,9 °C. Prvo odabrano ulje ima dominantno naftensko-aromatsku strukturu, što rezultira visokom osjetljivošću viskoznosti na promjene temperature. Za takva ulja smatra se da imaju indeks viskoznosti blizu nule i označavaju se slovom *L* ("low"), što ukazuje na nizak indeks viskoznosti. Drugo odabrano ulje ima pretežno parafinsku strukturu i pokazuje znatno manju promjenu viskoznosti s promjenom temperature. Za takva ulja smatra se da imaju indeks viskoznosti od 100 i označavaju se slovom *H* ("high"), što ukazuje na visoki indeks viskoznosti.



Slika 12. Ovisnost viskoznosti o temperaturi za određivanje indeksa viskoznosti [13].

- 3) **Gustoća**  $\rho$  je fizikalno svojstvo koje se opisuje omjerom mase  $m$  i volumena  $V$  nekog tvari. Gustoća je jedno od bitnijih svojstava materijala iz razloga što dosta drugih fizikalnih i kemijskih svojstava ovise o njoj. Gustoća ulja za kaljenje, poput mnogih drugih fizikalnih svojstava, varira s temperaturom. Naime, kako temperatura raste, gustoća ulja opada. Iz praktičnih razloga, vrijednosti gustoće obično se izražavaju i računaju na 15 °C. Idealno bi bilo da ulje za kaljenje zadrži što konstantniju gustoću tijekom promjena temperature. Na taj način, prilikom hlađenja vrućeg obratka u ulju, neće doći do značajnih promjena u gustoći, što će rezultirati očuvanjem ostalih svojstava ulja, kako fizikalnih tako i kemijskih, koji ovise o gustoći.

- 4) **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[14]. Plamište je kontrolna veličina. Kod svježih ulja omogućava prepoznavanje nečistoća, a kod upotrebljivanih ulja služi za ustanovljavanje razrjeđenja ulja.
  
- 5) **Točka tečenja** je fizikalno svojstvo ulja za kaljenje koje označava temperaturu pri kojoj se materijal prelazi iz tekućeg u kruto stanje [15]. Ovaj parametar ukazuje na temperaturu pri kojoj ulje gubi svoju tekuću konzistenciju i postaje nepomična masa. Da bismo odredili točku tečenja, postupno hladimo ulje i promatramo trenutak kada prestaje teći. Kad ulje dosegne svoju točku tečenja, postaje gotovo poput želatinozne mase koja više ne može teći. Točka tečenja ima značajnu važnost u kontekstu ulja za kaljenje jer ukazuje na to kako će se ulje ponašati u hladnim uvjetima. Ako ulje ima nisku točku tečenja, tada će postati čvrsto i nepokretno pri niskim temperaturama, što može uzrokovati izazove u njegovoj primjeni.
  
- 6) **Korozija na bakru** je kemijska karakteristika ulja za kaljenje koja pruža uvid u ponašanje ulja u prisutnosti kisika, odnosno njegovu oksidacijsku stabilnost. Tijekom postupka gašenja materijala u uljima, s vremenom dolazi do interakcije s okolnim medijem. Oksidacija postaje još izraženija kada se postupak provodi pri visokim temperaturama. Kada zagrijani materijal dođe u kontakt s uljem tijekom gašenja, materijal ima katalitički učinak koji dovodi do starenja ulja. Tijekom gašenja, dolazi do oslobađanja spojeva koji direktno utječu na svojstva ulja za kaljenje, kao što je viskoznost. Testiranje oksidacijske stabilnosti provodi se kako bi se ocijenila kvaliteta ulja za kaljenje i predvidio njegov vijek trajanja[16].
  
- 7) **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[16].

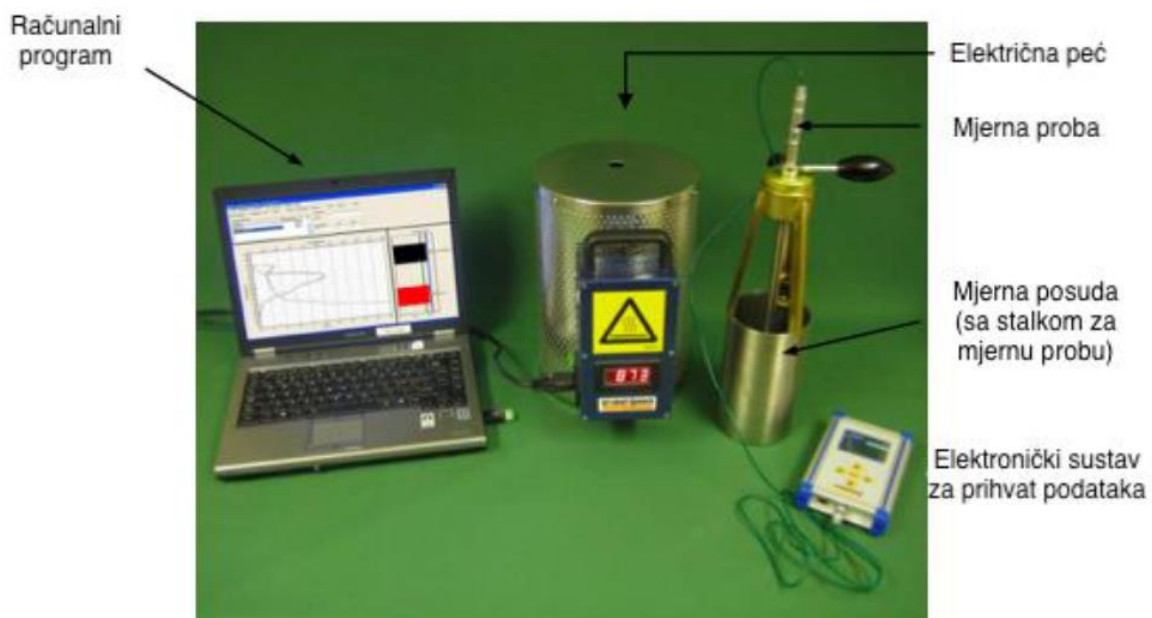
- 8) **Izgled, odnosno boja**, predstavlja fizikalno svojstvo ulja za kaljenje koje se koristi za procjenu njegove sposobnosti za daljnju upotrebu. Slično kao i sve druge komponente u industriji, ulja za kaljenje imaju svoj vijek trajanja. Promjena boje ulja nakon njegove upotrebe u procesu gašenja može ukazivati na potrebu za razmatranjem daljnje primjene tog ulja. Svježe ulje za kaljenje ne bi smjelo sadržavati čvrste čestice ili veće količine izdvojenih aditiva. Pojava zamućenja, ako je uzrokovana izdvajanjem parafina ili prisutnosti tragova vode, obično nema značajnih posljedica u praktičnoj primjeni i ne bi trebala značajno promijeniti svojstva ulja[16].

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio u sklopu ovog završnog rada odrađen je u laboratoriju za toplinsku obradu i inženjerstvo površina u prostorijama FSB-a. U sljedećim poglavljima prikazati će se 5 vrsta različitih sredstva koja su odabrana kako bi se prikazale njihove karakteristike ohlađivanja. Za snimanje krivulja ohlađivanja korištena je standardizirana laboratorijska metoda ISO 9950. Odabrani uzorci ispitivanih sredstava su :voda, mineralno ulje, sintetičko ulje, palmino ulje i suncokretovo ulje.

### 6.1. Opis ispitivanja sredstava za gašenje

Za praćenje procesa ohlađivanja u svrhu ispitivanja svojstava medija za ohlađivanje koristio se mjerno-analitički sustav IVF Smart Quench (slika 13).



**Slika 13. Mjerni sustav IVF Smart Quench za ispitivanje[17]**

Na slici 13. vidimo mjerni sustav IVF Smart Quench je napredni sustav za praćenje i kontrolu procesa gašenja u industriji toplinske obrade metala. Ovaj sustav koristi niz senzora i sofisticiranih algoritama kako bi pratila i analizirala različite parametre tijekom procesa gašenja. Evo nekoliko ključnih značajki ovog sustava:

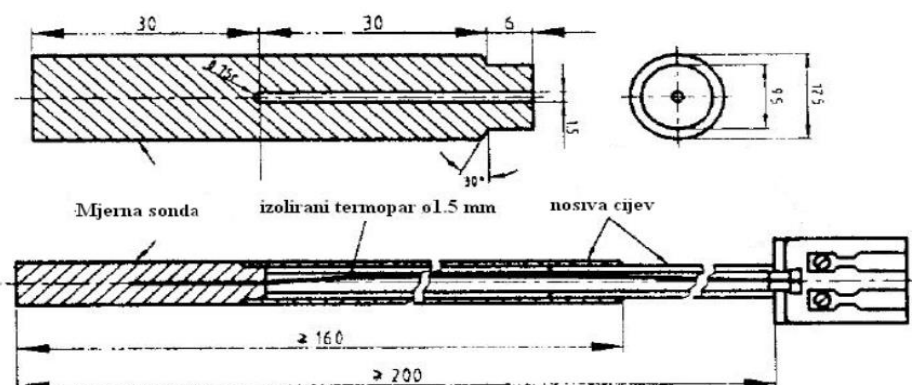
1. **Precizno Praćenje Temperature:** IVF Smart Quench precizno mjeri temperaturu obratka tijekom gašenja, omogućavajući kontroliranje brzine hlađenja.
2. **Praćenje Brzine Hlađenja:** Sustav prati brzinu kojom se materijal hladi tijekom gašenja, što je ključno za postizanje željenih mehaničkih svojstava.



3. **Kontrola Protoka Medija za Gašenje:** Može kontrolirati protok ulja ili drugog medija za gašenje kako bi se postigla optimalna brzina hlađenja.
4. **Analiza Parametara Gašenja:** IVF Smart Quench analizira rezultate i parametre gašenja te ih prikazuje u stvarnom vremenu. Također može generirati izvještaje i grafikone za dodatnu analizu.
5. **Automatska Prilagodba:** Sustav može automatski prilagoditi brzinu hlađenja kako bi se postigle željene karakteristike materijala.
6. **Upravljanje Parametrima:** Operaterima omogućava prilagodbu različitih parametara gašenja kako bi se postigli specifični zahtjevi za materijalom.

Mjerni sustav IVF Smart Quench sastoji se od sljedećih komponenata: mjerna proba, peć, mjerna posuda, elektronički sustav za prikupljanje podataka i računalni program IVF SQ Integra ver. 4.1TM. Mjerna sonda ima dimenzije  $\varnothing 12,5 \times 60$  mm i izrađena je od legure Inconel 600. U središtu sonde nalazi se izolirani termo element tipa K promjera 1,5 mm, a površina sonde je polirana ili fino brušena.

Proces ispitivanja krivulja ohlađivanja provodi se u nekoliko koraka. Prvo se mjerena sonda zagrijava na temperaturu od  $855\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nakon toga, sonda se ohladi u mirujućem sredstvu za hlađenje. Tijekom tog ohlađivanja, elektronički mjerni sustav redovito bilježi i pohranjuje temperature u središtu mjernog instrumenta. Program IVF SQ Integra se koristi za analizu snimljenih krivulja ohlađivanja. Iz tih krivulja ohlađivanja od  $855\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , programa se određuju sljedeći parametri: vrijeme potrebno za ohlađivanje od  $855\text{ }^{\circ}\text{C}$  do navedenih temperatura, oblik i vrijednosti brzine ohlađivanja. Svi ovi parametri zatim se prikazuju i pohranjuju za daljnju analizu.



Slika 14. Shematski prikaz mjerne probe za ispitivanje krivulja

Tablica 2. Popis korištenih oznaka s objašnjenjem

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	OPIS
$CR_{300}$	$^{\circ}\text{C}/\text{s}$	Brzina ohlađivanja pri 300 $^{\circ}\text{C}$
$CR_{550}$	$^{\circ}\text{C}/\text{s}$	Brzina ohlađivanja pri 550 $^{\circ}\text{C}$
$CR_{max}$	$^{\circ}\text{C}/\text{s}$	Maksimalna brzina ohlađivanja
T(CRMax)	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura pri kojoj dolazi do maksimalne brzine ohlađivanja
t(CRMax)	s	Vrijeme nakon kojeg se postigne maksimalna brzina ohlađivanja
Time to 200	s	Vrijeme ohlađivanja do 200 $^{\circ}\text{C}$
Time to 400	s	Vrijeme ohlađivanja do 400 $^{\circ}\text{C}$
Time to 600	s	Vrijeme ohlađivanja do 600 $^{\circ}\text{C}$
$T_{cp}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura prijelaza iz faze mjehuričastog vrenja u konvekcijski prijelaz topline
$T_{vp}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura prijelaza iz faze parnog omotača u fazu mjehuričastog vrenja

Tablica 2. pokazuje i definira oznake koje će se koristiti u eksperimentalnom ispitivanju sredstava za gašenje.

## 6.2. Ispitivana sredstva

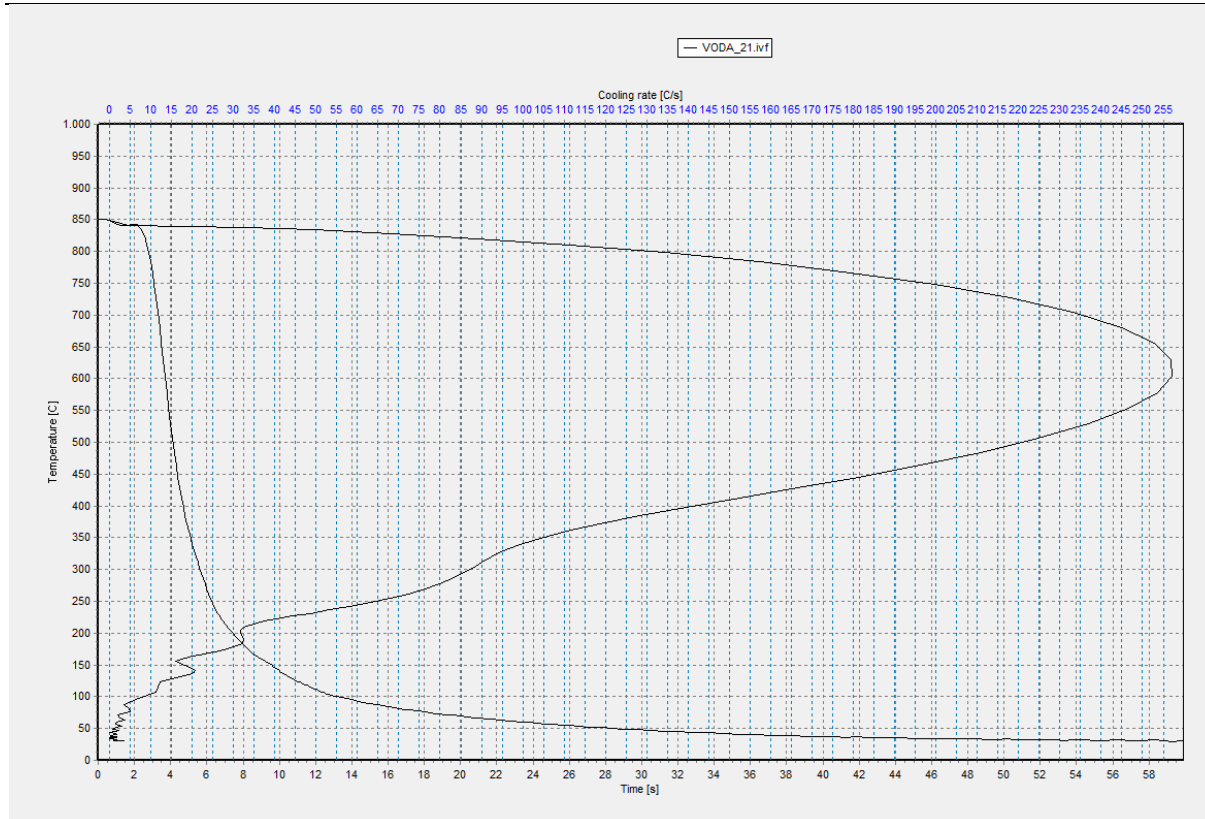
Sredstva koja su podvrgnuta ispitivanju su: voda, mineralno ulje, sintetičko ulje, palmino ulje i suncokretovo ulje. Sva sredstva su korištena na istim temperaturama od 21°C i u istim količinama od 1 litra.

## 6.3. Rezultati ispitivanja

Na slikama 15-20 prikazane su krivulje ispitivanja ispitnih uzoraka sredstava za kaljenje oznake redom:

VODA\_21, MINERALNO\_ULJE\_21, SINTETICKO\_ULJE\_21, PALMINO\_ULJE\_21 i  
SUNCOKRETOVO\_ULJE\_21.

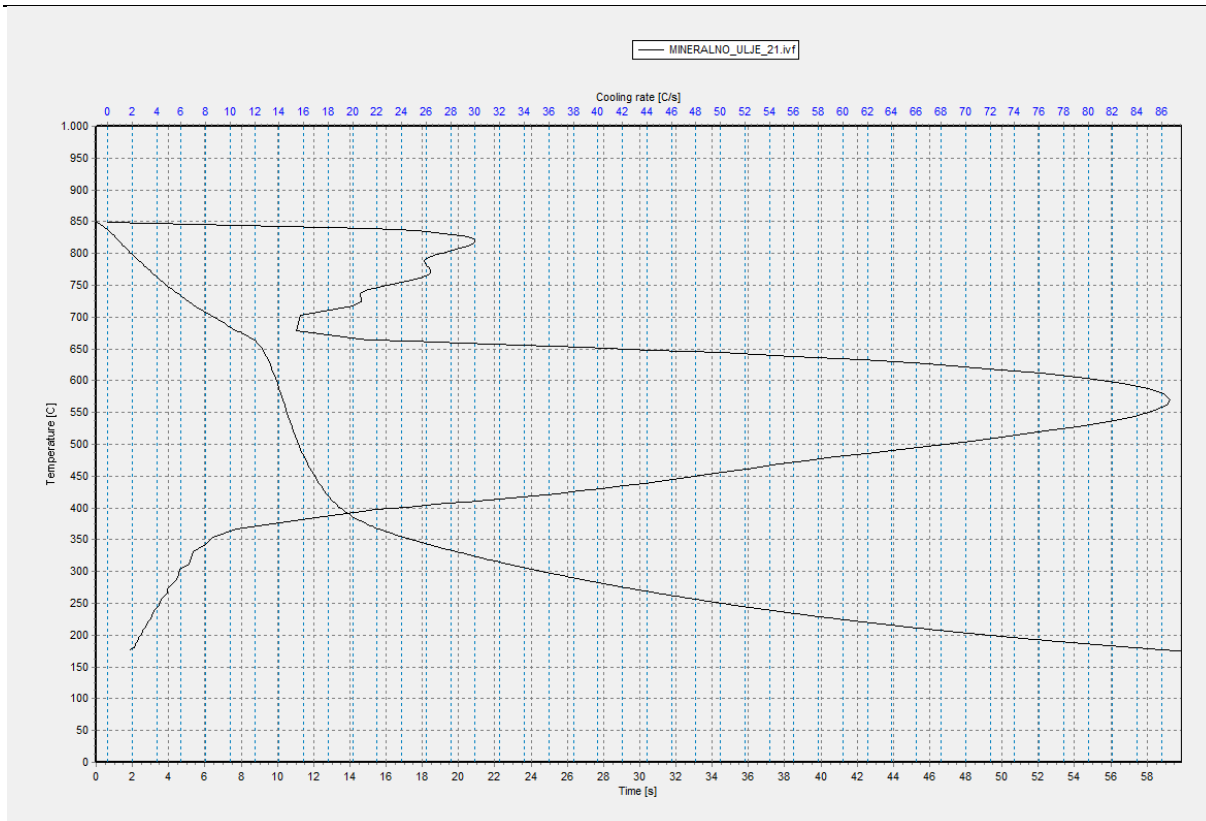
Ispitivanje uzoraka provedeno je pomoću mjernog sustava IVF Smart Quench u skladu s normom ISO 9950. Postupak ispitivanja odvijao se u električnoj peći IVF s automatskom regulacijom temperature na temperaturi od  $850 \pm 5$  °C. Mjerna sonda je prethodno ugrijana tijekom 5 minuta prije početka ispitivanja, a temperatura sonde na početku ohlađivanja bila je 855 °C. Tijekom ohlađivanja, zapisi o temperaturi u središtu sonde prikupljeni su tijekom 60 sekundi. Točnost regulacije temperature u peći iznosila je  $\pm 2,5$  °C za svakih 60 mm visine peći. Temperatura ispitivanih sredstava za gašenje na početku snimanja krivulje bila je 22 °C, dok je temperatura prostorije u kojoj je ispitivanje provedeno iznosila 23 °C. Prije samog ispitivanja, mjerne sonde uređaja temeljito su očišćene brusnim papirom granulacije 1000 kako bi se uklonili oksidi s površine sonde i eventualne nečistoće koje su se mogle nakupiti tijekom prethodnih ispitivanja. Ovo je provedeno kako bi se osigurala točnost rezultata i minimizirala potencijalna odstupanja od stvarnih vrijednosti.



**Slika 15. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja (brzina ohlađivanja-temperatura) ispitnog uzorka sredstva za kaljenje oznake VODA\_21**

**Tablica 3. Izmjereni parametri ohlađivanja za VODA\_21**

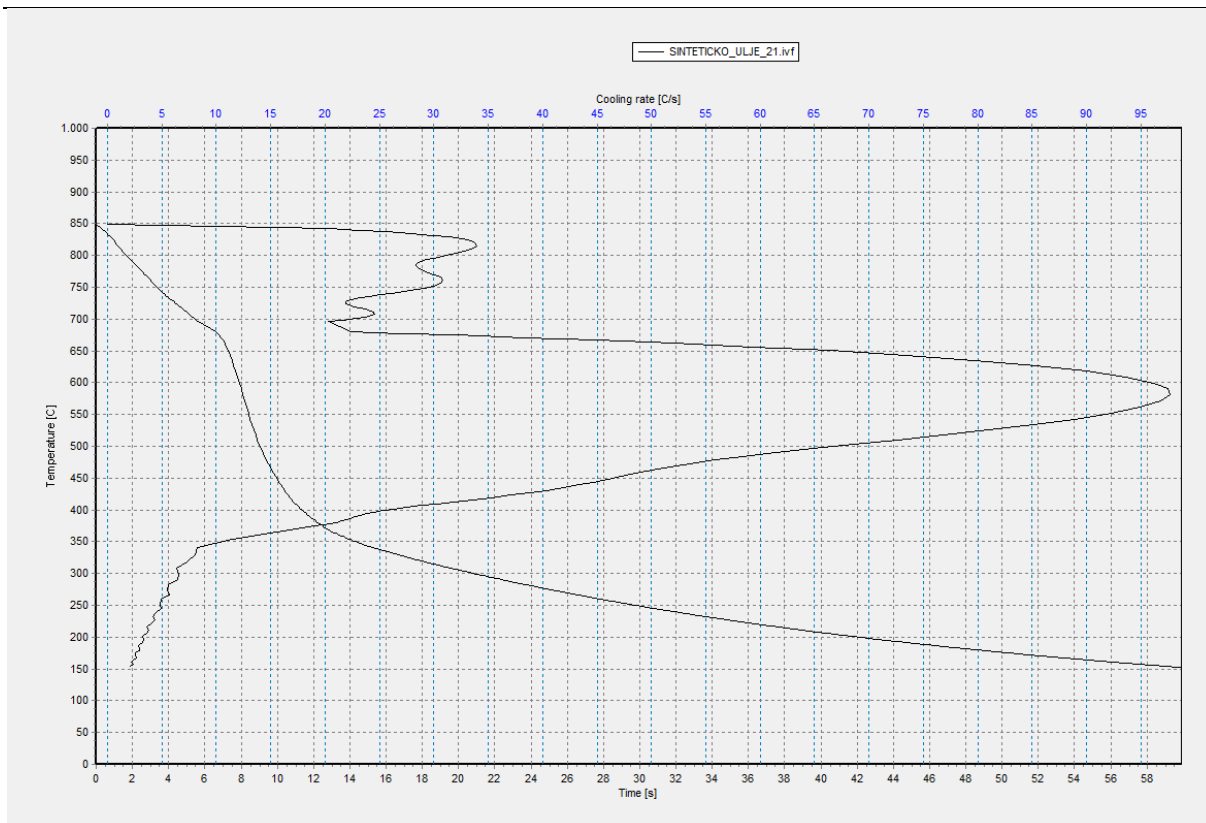
NAZIV ISPITNOG UZORKA	VODA_21
$CR_{300}$ [°C/s]	87.2
$CR_{550}$ [°C/s]	245.34
$CR_{max}$	256.87
T(CRMax) [°C]	600.91
t(CRMax) [s]	3.71
Time to 600 °C [s]	3.72
Time to 400 °C [s]	4.68
Time to 200 °C [s]	7.46
T <sub>vp</sub> [°C]	841.64
T <sub>cp</sub> [°C]	202.55



Slika 16. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja (brzina ohlađivanja-temperatura) ispitnog uzorka sredstva za kaljenje oznake MINERALNO\_ULJE\_21

Tablica 4. Izmjereni parametri ohlađivanja za MINERALNO\_ULJE\_21

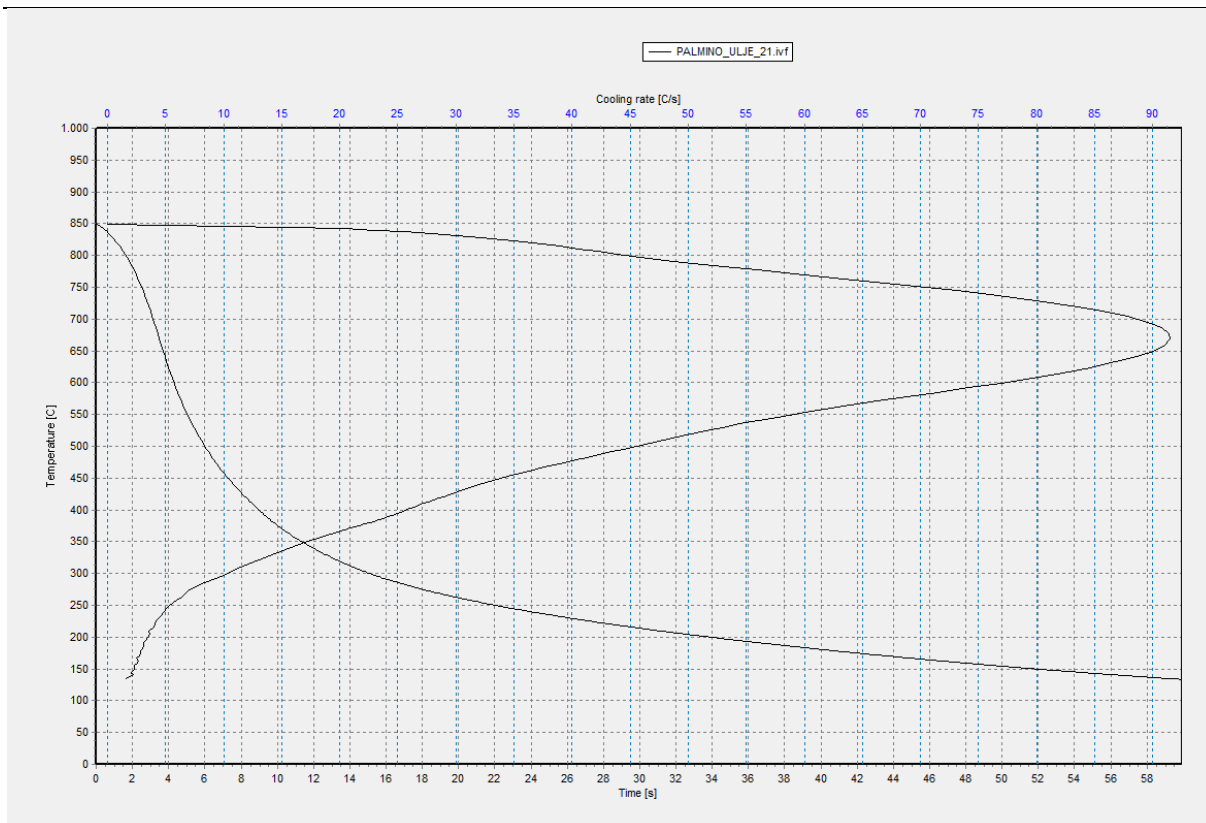
NAZIV ISPITNOG UZORKA	MINERALNO_ULJE_21
$CR_{300}$ [°C/s]	6.05
$CR_{550}$ [°C/s]	84.93
$CR_{max}$	86.66
T(CRMax) [°C]	571.44
t(CRMax) [s]	10.29
Time to 600 °C [s]	9.95
Time to 400 °C [s]	13.47
Time to 200 °C [s]	49.19
T <sub>vp</sub> [°C]	672.98
T <sub>cp</sub> [°C]	347.38



Slika 17. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja (brzina ohlađivanja-temperatura) ispitnog uzorka sredstva za kaljenje oznake SINTETICKO\_ULJE\_21

Tablica 5. Izmjereni parametri ohlađivanja za SINTETICKO\_ULJE\_21

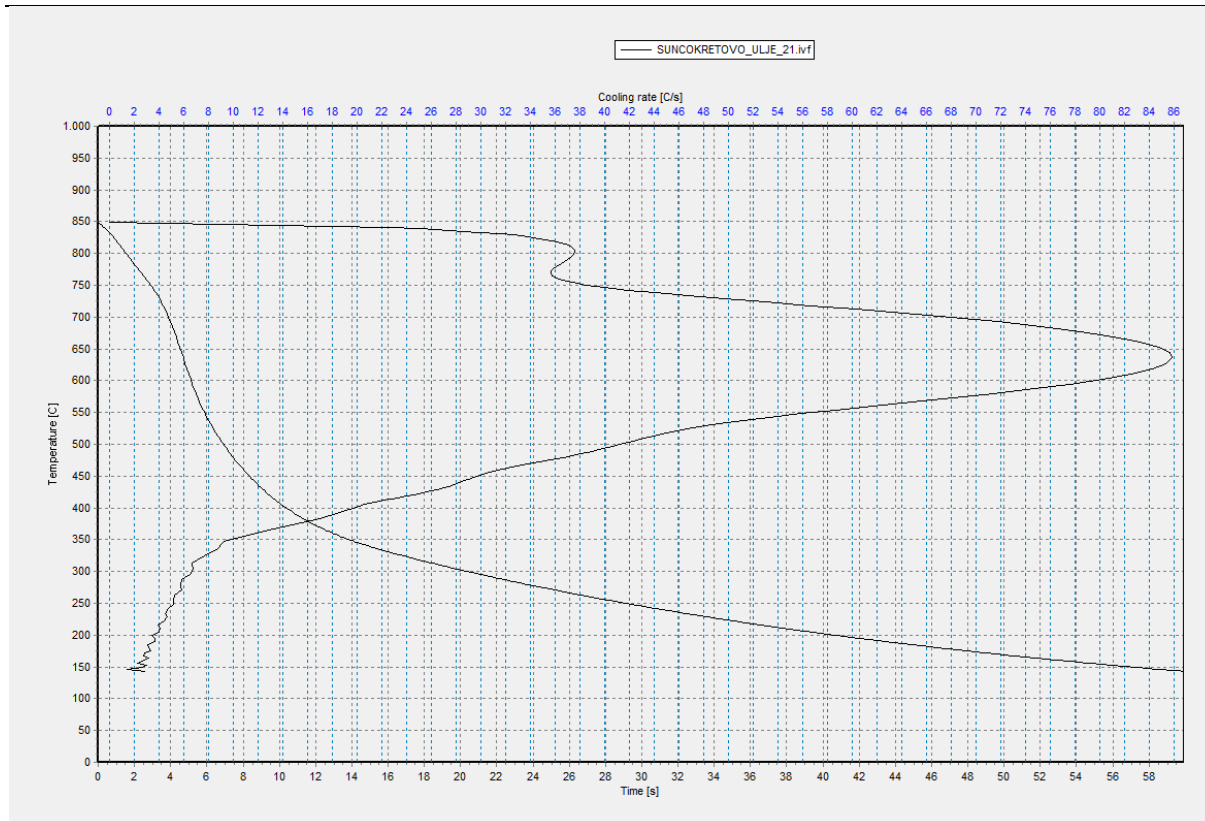
NAZIV ISPITNOG UZORKA	SINTETICKO_ULJE_21
$CR_{300}$ [°C/s]	6.63
$CR_{550}$ [°C/s]	91.71
$CR_{max}$	97.71
T(CRMax) [°C]	584.91
t(CRMax) [s]	8.05
Time to 600 °C [s]	7.9
Time to 400 °C [s]	11.35
Time to 200 °C [s]	42.06
$T_{vp}$ [°C]	687.4
$T_{cp}$ [°C]	337.39



**Slika 18. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja (brzina ohlađivanja-temperatura) ispitnog uzorka sredstva za kaljenje oznake PALMINO\_ULJE\_21**

**Tablica 6. Izmjereni parametri ohlađivanja za PALMINO\_ULJE\_21**

NAZIV ISPITNOG UZORKA	PALMINO_ULJE_21
$CR_{300}$ [°C/s]	10.34
$CR_{550}$ [°C/s]	58.94
$CR_{max}$	91.51
T(CRMax) [°C]	671.5
t(CRMax) [s]	3.46
Time to 600 °C [s]	4.29
Time to 400 °C [s]	8.97
Time to 200 °C [s]	33.87
$T_{vp}$ [°C]	849.76
$T_{cp}$ [°C]	226.82



**Slika 19. Krivulja ohlađivanja (temperatura-vrijeme) i krivulja brzine ohlađivanja (brzina ohlađivanja-temperatura) ispitnog uzorka sredstva za kaljenje oznake SUNCOKRETOVO\_ULJE\_21**

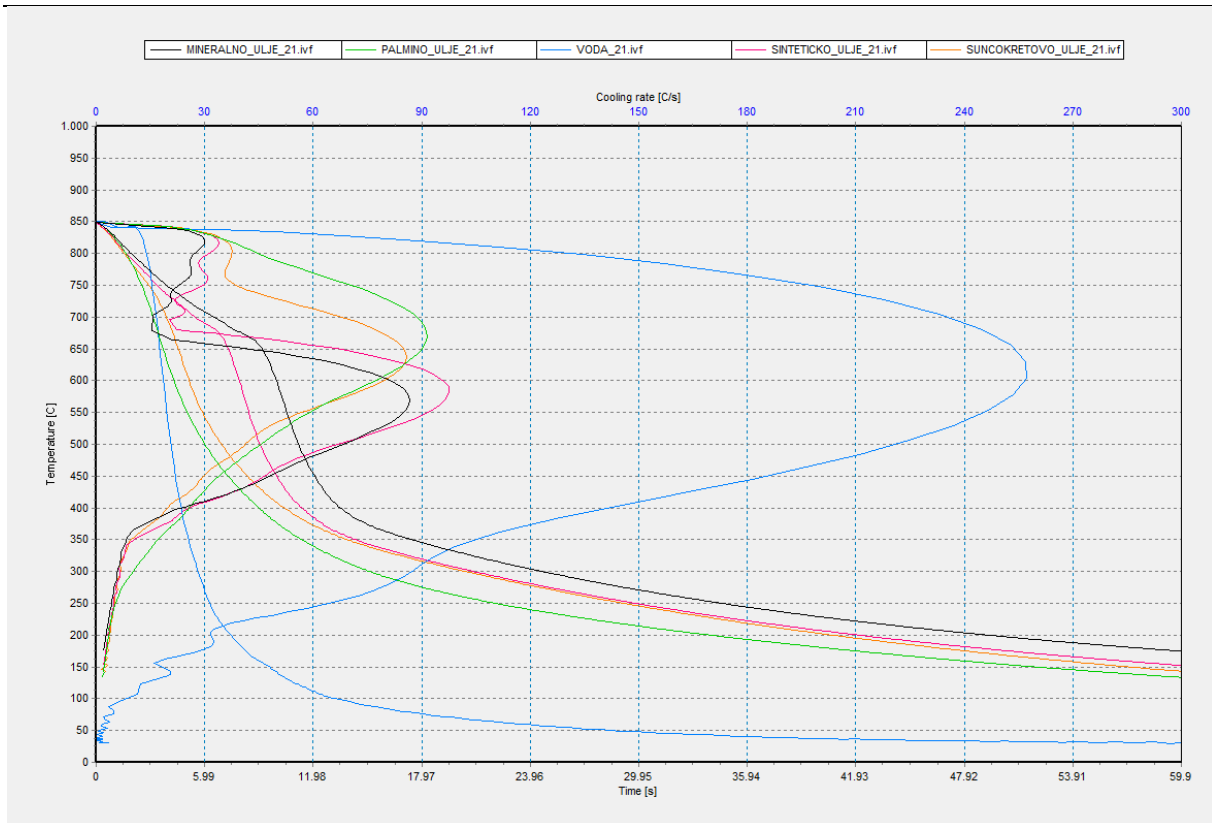
**Tablica 7. Izmjereni parametri ohlađivanja za SUNCOKRETOVO\_ULJE\_21**

NAZIV ISPITNOG UZORKA	SUNCOKRETOVO_ULJE_21
$CR_{300}$ [°C/s]	6.17
$CR_{550}$ [°C/s]	56.82
$CR_{max}$	85.79
T(CRMax) [°C]	635.49
t(CRMax) [s]	4.7
Time to 600 °C [s]	5.13
Time to 400 °C [s]	10.37
Time to 200 °C [s]	40.59
$T_p$ [°C]	769.4
$T_{cp}$ [°C]	343.85



#### **6.4. Analiza rezultata ispitivanja**

Analizom rezultata ispitivanja jasno je vidljivo da je najbrže sredstvo ohlađivanja VODA\_21, njezina brzina ohlađivanja do 300°C vidljivo odskače od ostalih uzoraka, također je ovom uzorku potrebno najmanje vrijeme do postizanja maksimalne brzine ohlađivanja. Konstatirajući ove činjenice iz krivulja možemo zaključiti da je voda najagresivnije sredstvo ohlađivanja, koje najbrže gasi materijal, ali upravo zbog toga i izaziva najveće deformacije i izaziva najveću opasnost od pojave pukotina. Biljna ulja su odmah nakon vode što se tiče brzine ohlađivanja, palmino je prema grafovima i ispitivanju agresivnije sredstvo gašenja u odnosu na suncokretovo ulje, mineralno i sintetičko ulje su najsporija sredstva za gašenje, prema tome imaju i najmanju mogućnost za pojavu deformacija i pukotina. Iz slike 8. jasno se vidi da  $CR_{300}$  za mineralno, sintetičko i suncokretovo ulje iznosi približno oko 6°C/s, što je karakteristika ulja za intenzivno gašenje, dok palmino ulje odskače od tih vrijednosti za 4°C/s. Analizom rezultata je utvrđeno da se vodom kao sredstvom za gašenje postiže najveća tvrdoća i zakaljenost, ali imamo najveću opasnost od pojave zaostalih naprezanja, dok kod ostala 4 sredstva uz pojedine razlike imamo srednje i blaga sredstva za gašenje, koja nisu baš pogodna za gašenje kod alatnih i konstrukcijskih čelika.



**Slika 20. Prikaz svih sredstava za gašenje na jednom grafu**

Na slici 20. se još jednom jasno vidi razlika između vode kao sredstva za gašenje i ulja kao sredstva za gašenje, voda postiže puno veće brzine ohlađivanja koje stvaraju visoku tvrdoću kaljenih obradaka, ali upravo takav način donosi veliku opasnost od zaostalih naprezanja i deformacija. Ulja kao sredstva za gašenje imaju razlike među svoji vrstama kao što smo dobili razlike između biljnih, sintetičkih i mineralnih ulja, ali odstupanja nisu prevelike, upravo zato smo uzeli i vodu kao jedno od sredstava za gašenje da bih prikazali kolika razlika između karakteristika sredstava za ohlađivanja može biti, iako su sa korištena na istoj temperaturi i u istim količinama. Po rezultatima je isto tako zanimljivo istaknuti da se vrijednostima palmino ulje najviše približilo vodi.

---

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu ispitan sredstva za gašenje: VODA\_21, MINERALNO\_ULJE\_21, SINTETICKO\_ULJE\_21, PALMINO\_ULJE\_21 i SUNCOKRETOVO\_ULJE\_21. Ispitivanje je provedeno pomoću mjernog sustav IVF Smart Quench s pomoću kojeg smo dobili rezultate koji su prikazani grafički kao dijagrami „temperatura-vrijeme ohlađivanja” i „brzina ohlađivanja-temperatura”. Iz dobivenih grafova očitali smo karakteristike sredstava za ohlađivanje kao što su :maksimalna brzina ohlađivanja i vrijeme koje je potrebno da se dođe do te temperature, također temperature prijelaza iz faze parnog omotača u fazu mjehurastog vrenja i iz faze mjehurastog vrenja u fazu konvekcije. Rezultati su pokazali da voda jednostavno u potpunosti odskače u gotovo svim vrijednostima u odnosu na ulja, te da je voda uvjerljivo najagresivnije sredstvo za gašenje koje smo ispitivali, upravo zbog te agresivnosti voda izaziva najveću tvrdoću zakaljenog sloja, ali i najveća zaostala naprezanja i deformacije. Ulja kao sredstva za gašenje su dosta ekvivalentna u rezultatima pogotovo biljna ulja (suncokretovo i palmino), te zajedno s mineralnim i sintetičkim uljima se ne mogu koristiti za kaljenje konstrukcijskih i alatnih materijala zbog svog ne agresivnog djelovanja koje ne postiže dovoljnu tvrdoću zakaljenog stroja, također ulja su vrlo podložni starenju procesu koji uvelike smanjiva njihove performanse.

**LITEARTURA**

- [1] Cajner, F., Matijević, B., Toplinska obrada, Autorizirane podloge za predavanja, FSB Zagreb, 2012.
- [2] Stupnišek, M., Cajner, F., Osnove toplinske obradbe metala, Sveučilište u Zagrebu, 2001.
- [3] 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>.
- [4] Pedišić, Lj., Matijević, B., Munić, J., Utjecaj koncentracije vodomješivih tekućina za obradbu metala na sposobnost ohlađivanja, Goriva i maziva 47, 6 (2008) 437-462.
- [5] Totten, G.E., Steel heat treatment: Metallurgy and technologies, 2nd edition, Taylor & Francis Group, New York, U.S.A., 2006.
- [6] Scott MacKenzie D., Lazerev I., Care and Maintenance of Quench Oils, Journal of Heat Treatment and Materials 71, 5 (2016) 230-236.
- [7] Bashvord A., Mills A.J., The Development of Improved Additives for Quenching Oils using Laboratory Simulation, Heat treatment of Metals, 1 (1984) 9-14.
- [8] Quenchants: For the heat-treatment of steel, cast iron and aluminium alloys, Petrofer GmbH, 2010.
- [9] Bashford, A., Mills, A.J., The Development of Improved Additives for Quenching Oils Using Laboratory Simulation, Heat Treatment of Metals, January 1984., 1984.1 p.15-20.
- [10] Wachter, D.A., Totten, G.E., Webster, G.M., Quenchant fundamentals: Quench oil bath maintenance, Adv. Mat. & Proc., 1997.
- [11] O.O. Fasina & Z. Colley (2008) Viscosity and Specific Heat of Vegetable Oils as a Function of Temperature: 35°C to 180°C, International Journal of Food Properties, 11:4, 738-746, DOI: 10.1080/10942910701586273.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] A. Marinčić, “ Ispitivanje fizikalnih i kemijskih svojstva ulja za kaljenje,” *info:eu-repo/semantics/masterThesis*, University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2023. Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:843634>.
- [17] <https://www.swerea.se/en/areas-of-expertise/manufacturing-processes/heat-treatment/ivf-smartquench-equipment>.

---

**PRILOZI**

I. CD-R disc