

# Mjerenje ogrjevne vrijednosti otpadnog jestivog ulja

---

**Matijević, Matea**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:950419>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-05**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**MJERENJE OGRJEVNE VRIJEDNOSTI**

**OTPADNOG JESTIVOG ULJA**

Rijeka, rujan 2024.

Matea Matijević

0069081731

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**MJERENJE OGRJEVNE VRIJEDNOSTI**

**OTPADNOG JESTIVOG ULJA**

Rijeka, rujan 2024.

Matea Matijević

0069081731

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
**POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE**

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**  
Predmet: **Toplinska mjerenja**  
Grana: **2.11.02 procesno energetska strojarstvo**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Matea Matijević (0069081731)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva  
Modul: Procesno i energetska strojarstvo

Zadatak: **Mjerenje ogrjevnih vrijednosti otpadnog jestivog ulja / Measurement of the heating value of waste cooking oil**

**Opis zadatka:**

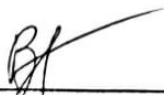
Zadatak rada je eksperimentalno odrediti ogrjevnu vrijednost otpadnog jestivog ulja. Eksperimentalna mjerenja vršit će se u Laboratoriju za toplinska mjerenja tehničkog fakulteta u Rijeci koristeći Parr 1341 kalorimetar. Potrebno je opisati metodologiju pripreme uzorka, kalibraciju instrumenta i sam tijekom mjerenja. Dobivene rezultate potrebno je na odgovarajući način obraditi, analizirati i prikazati, te ih usporediti s podacima dostupnim iz literature.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Matea Matijević*

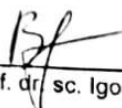
Zadatak uručen pristupniku: 22. ožujka 2023.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## **IZJAVA O SAMOSTALNOSTI IZVEDBE I PISANJA RADA**

Izjavljujem da sam diplomski rad pod naslovom „Mjerenje ogrjevnne vrijednosti otpadnog jestivog ulja“ napisala samostalno na temelju stečenog znanja tijekom studija koristeći stručnu literaturu uz vodstvo i pomoć mentora izv. prof. dr. sc. Igora Bonefačića.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Igoru Bonefačiću na pruženom znanju tijekom studija te izdvojenom vremenu za odrađivanje laboratorijskih vježbi i savjetovanju oko pisanja rada.

Zahvalila bih se svojoj obitelji, prijateljima, kolegama i svima koji su mi pružili podršku i razumijevanje tijekom studiranja.

# SADRŽAJ

1	UVOD .....	8
2	POVIJESNI RAZVOJ .....	9
3	MJERENJE OGRJEVNE VRIJEDNOSTI.....	10
3.1	Teorijska osnova.....	10
3.2	Definicija i podjela goriva .....	11
4	ODREĐIVANJE OGRJEVNE MOĆI KALORIMETRIRANJEM .....	13
4.1	Opis pripreme za kalorimetriranje .....	15
5	LABORATORIJSKA MJERENJA I ANALIZA REZULTATA.....	16
5.1	Opis kalorimetriranja .....	16
5.2	Priprema uzorka goriva .....	17
5.3	Priprema kalorimetrijske bombe .....	19
5.4	Rezultati mjerenja ogrjevne vrijednosti tablete za kalibraciju .....	20
5.5	Rezultati prvog mjerenja ogrjevne vrijednosti otpadnog suncokretovog ulja.....	23
5.6	Rezultati drugog mjerenja ogrjevne vrijednosti otpadnog suncokretovog ulja.....	26
5.7	Rezultati trećeg mjerenja ogrjevne vrijednosti otpadnog ulja iz domaćinstva .....	28
5.8	Rezultati četvrtog mjerenja ogrjevne vrijednosti otpadnog ulja iz restorana .....	30
6	PROIZVODNJA BIODIZELA.....	32
7	PRIMJENA ENERGIJE IZ OTPADNOG JESTIVOG ULJA .....	34
7.1	Ugostiteljski lanci .....	34
7.2	Pomorski transport.....	36
7.3	Proces rada motora s pogonom na biodizel .....	37
8	ANALIZA TRŽIŠTA .....	39
8.1	Odlaganje i otkup otpadnih jestivih ulja u Hrvatskoj .....	42
9	ZAKLJUČAK .....	45
10	LITERATURA.....	47

11	POPIS SLIKA .....	48
12	POPIS TABLICA.....	49
13	SAŽETAK.....	50
14	SUMMARY .....	51



# 1 UVOD

Diplomski rad u ovom slučaju orijentiran je na eksperimentalno određivanje gornje ogrjevne vrijednosti jestivog ulja. Eksperimentalnim određivanjem vrijednosti te analizom rezultata postavljaju se temelji za daljnju upotrebu. Napravljeno je više mjerenja kako bi se usporedili rezultati, provjerila vrijednost konstante te napravila usporedba s istom vrstom ulja iz drugog izvora na temelju čega bi se utvrdili razlike te uzroci istih. Navedena mjerenja odrađena su na Tehničkom fakultetu Rijeka u Laboratoriju za toplinska mjerenja uz stručno vođenje doc. dr. sc. Igor Bonefačić.

Za početak u nastavku će biti objašnjeni ključni termini za razumijevanje postupka vježbe i proračuna ogrjevne vrijednosti. Između ostalog rad je popraćen i kontekstom primjene jestivog ulja kao goriva uz uvod kako je došlo do ovakvih saznanja, trenutnih mogućnosti i osobnog zaključka o daljnjem razvoju u budućnosti u budućnosti.

Dalje u radu detaljno su opisani postupci provedenih mjerenja uz opremu koja je bila potrebna za izvođenje vježbi. Sva mjerenja temeljena su na uvjetima koje propisuje Parr Operating Instruction Manual No.204M [\[1\]](#).

## 2 POVIJESNI RAZVOJ

S obzirom na trenutno razdoblje koje je popraćeno velikom iskorištavanju fosilnih goriva i njihovim štetnim utjecajima na okoliš, već dugi niz godina radi se na istraživanju i prijelazu na obnovljive izvore energije. Kao što je ranije spomenuto u ovom radu biti će predstavljeno korištenje energije dobivene iz otpadnog jestivog ulja s dosadašnjim istraživanjima i napravljenim laboratorijskim vježbama koje će poduprijeti teoriju.

Biogoriva se proizvode iz biomase i obuhvaćaju razne vrste goriva kao što su bioetanol i biodizel. Prve generacije biogoriva proizvode se od prehrambenih usjeva uzgojenih na obradivom tlu. Šećer, škrob ili ulje sadržano u njima pretvara se u biodizel ili etanol. Druga generacija biogoriva proizvodi se na osnovu lignoceluloze, drvene biomase, poljoprivrednih ostataka, komunalnog otpada i otpadnog biljnog ulja. Treća generacija dobiva se iz uzgoja mikroalgi.

Biodizel koji je poznat još pod nazivom FAME (metilni esteri masnih kiselina), dio je skupine goriva koja se dobivaju iz obnovljivih izvora te se koriste u dizelskim motorima. Prednosti korištenja biodizela su višestruke kao na primjer: niža cijena, produženi vijek trajanja motora zbog poboljšane mazivosti, smanjenje čađe kao produkta izgaranja te doprinosi smanjenju emisije CO<sub>2</sub>. Usporedno s fosilnim gorivima, sagorijevanje biodizela u atmosferu ne ispušta nove količine ugljikovog dioksida jer to kružni proces u kojem se vraća ranije potrošena količina koju je biljka iskoristila za potrebe procesa fotosinteze. Također, glavna karakteristika je i njegova potpuna biološka razgradivost.

Kako bi ovakvo rješenje doseglo vrhunac svoje primjene, potrebno je istražiti i analizirati sljedeće:

- dostupnost, troškove i porijeklo biogoriva kao brodskog goriva
- miješanje goriva – kompatibilnost različitih biogoriva
- izbjegavanje miješanja s vodom tijekom rukovanja/skladištenja zbog moguće kontaminacije

### 3 MJERENJE OGRJEVNE VRIJEDNOSTI

#### 3.1 Teorijska osnova

Općenito ogrjevna vrijednost tvari prema definiciji je količina topline koja se oslobađa prilikom izgaranja određene količine te tvari. Razlikujemo gornju i donju ogrjevnu vrijednost prema količini topline koja se oslobodi kondenzacijom vodene pare iz dimnih plinova izgaranja.

Gornja ogrjevna vrijednost ( $H_g$ ) je toplina koja se oslobađa pri izgaranju goriva, nakon čega se dodatno iskorištava toplina kondenzacije vodene pare iz dimnih plinova tj. to je najveća moguća energija koja se može dobiti izgaranjem nekog goriva.

Donja ogrjevna vrijednost ( $H_d$ ) je toplina koja je oslobođena procesom izgaranja goriva bez dodatnog iskorištavanja topline kondenzacije vodene pare.

Mjerne jedinice za ogrjevnu vrijednost mogu biti J/mol, J/kg ili J/m<sup>3</sup>. Donju i gornju ogrjevnu moć moguće je izračunati analitički za goriva s poznatim kemijskim sastavom pojedinih elemenata, dok je u slučajevima kada nije poznat sastav goriva ogrjevnu moć moguće odrediti uz pomoć mjerenja (kalorimetriranja).

Analitički izraz za određivanje donje ogrjevne moći:

$$H_d = 33900 \cdot c + 117000 \cdot \left( h - \frac{0}{8} \right) + 10500 \cdot s - 2500 \cdot w \text{ [kJ/kg]} \quad 3.1$$

Poveznica između gornje i donje ogrjevne moći:

$$H_g = H_d + r_0 \cdot m_{H_2O} = H_d + 2500 \cdot (9 \cdot h + w) \text{ [kJ/kg]} \quad 3.2$$

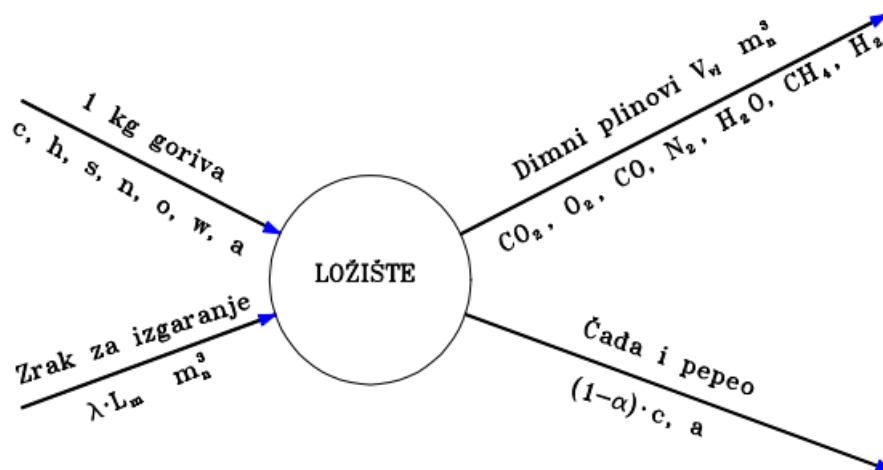
### 3.2 Definicija i podjela goriva

Prema definiciji gorivo je materija koja ima mogućnost oslobađanja energije kao posljedice promjene kemijske ili fizikalne strukture. Gorivo oslobađa energiju kemijsko reakcijom koju nazivamo izgaranje ili nuklearnom reakcijom kao što su nuklearna fisija ili fuzija. Najvažnije svojstvo goriva je da se energija goriva može uskladištiti i po potrebi osloboditi. Sastav organskih goriva je složen te ovisi o porijeklu goriva i načinu postanka, s u najvećem broju slučajeva točan kemijski sastav goriva je nepoznat.

Osnovni zahtjevi praktične primjene koje gorivo mora zadovoljiti su:

- dovoljna raspoloživost goriva
- omogućena eksploatacija
- prihvatljiva cijena

Izgaranje je kemijski proces oslobađanja energije kod kojeg dolazi do brze reakcije molekula gorivih elemenata s kisikom. Produkti izgaranja su čađa, pepeo i dimni plinovi. Sastav dimnih plinova ovisi o sastavu goriva, pretičku zraka i načinu izgaranja. Također, izgaranje može biti potpuno ili nepotpuno, o čemu ovisi da li će sve molekule iz goriva u procesu izgaranja uspjeti oksidirati. U slučaju potpunog izgaranja produkti su:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{SO}_2$ , dok u slučaju nepotpunog izgaranja nastaju  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}$  i  $\text{CH}_4$ . Slika 2.1 shematski prikazuje elemente goriva koje ulazi u ložište, zraka za izgaranje te produkte izgaranja.



Slika 3.1 Shematski prikaz elemenata na ulazu i izlazu iz ložišta [2]

c, h, s, o, n – maseni udjeli elemenata (ugljika, vodika, sumpora, kisika, dušika)

a – maseni udio pepela

w – maseni udio vode

$$c + h + s + o + a + n + w = 1$$

Minimalna količina kisika koja je potrebna za izgaranje:

$$O_{min} = 2,666 \cdot c + 8 \cdot h + s - o \text{ [kg/kg}_{goriva}] \quad 3.3$$

Minimalna potrebna količina zraka za izgaranje:

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{0,233} \text{ [kg/kg}_{goriva}] \quad 3.4$$

Stvarna količina zraka izražava se preko faktora pretička zraka  $\lambda$ :

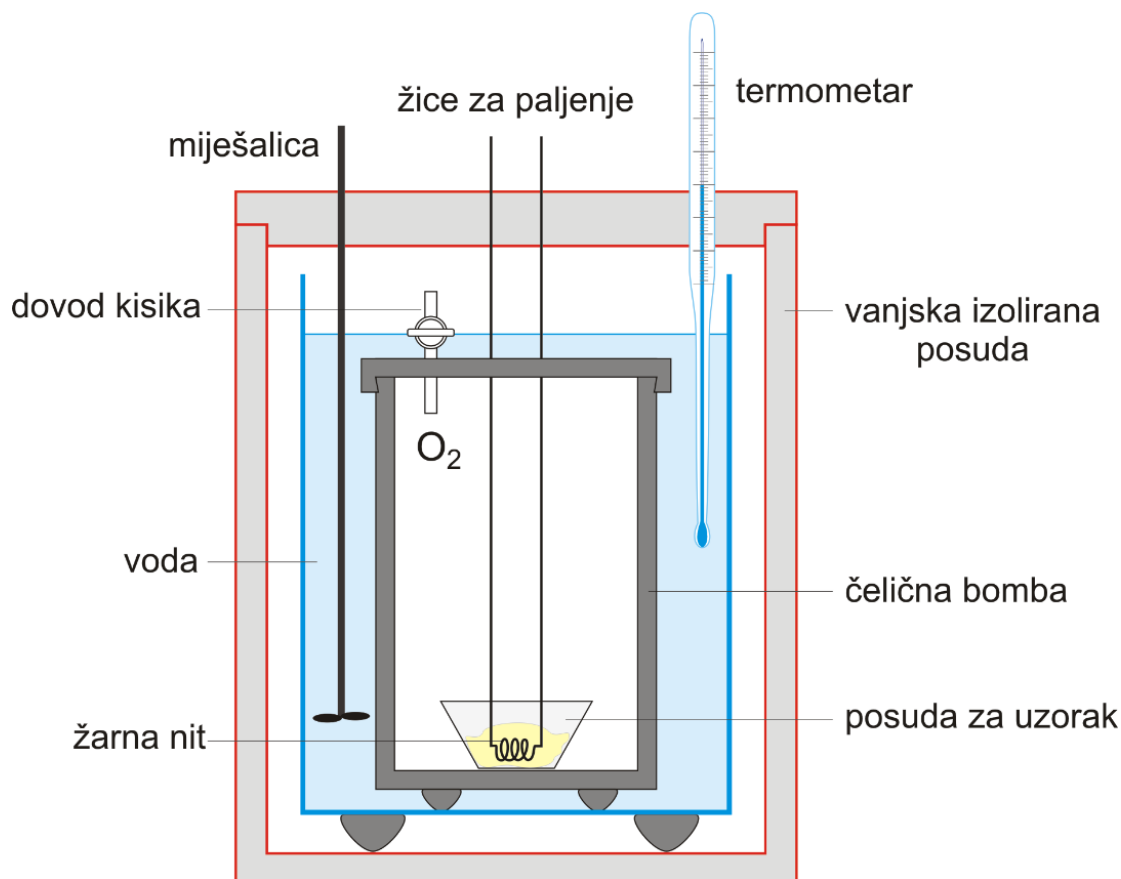
$$L_{stv} = \lambda \cdot L_{min} = \lambda \cdot \frac{O_{min}}{0,233} \text{ [kg/kg}_{goriva}] \quad 3.5$$

Faktor pretička zraka  $\lambda$  za izgaranje ovisi o: vrsti goriva, načinu pripreme, obliku i veličini čestice goriva, udjelu isparljivih sastojaka, brzini izgaranja, temperaturi zapaljenja, temperaturi zraka za izgaranje itd.

U slučaju da je pretičak zraka premali kao posljedicu imamo nepotpuno izgaranje, kao produkt izgaranja nastaje CO te posljedično je smanjena učinkovitost. Dok u suprotnom slučaju, prevelikog pretička zraka kao posljedica nastaje veća količina dimnih plinova što znači i veće gubitke osjetne topline izlaznih dimnih plinova.

## 4 ODREĐIVANJE OGRJEVNE MOĆI KALORIMETRIRANJEM

Kalorimetriranje se definira kao postupak kojim se određuje ogrjevna moć goriva eksperimentalnim putem. Toplinska energija koja se oslobađa pri izgaranju uzorka goriva unutar kalorimetrijske bombe utroši se na povećanje temperature kalorimetrijske vode i kalorimetrijske bombe. Slika 3.1 prikazuje presjek kalorimetrijske bombe s označenim njezinim dijelovima.



Slika 4.1 Prikaz kalorimetrijske bombe

Poznati su podaci toplinskog kapaciteta vode, količine vode i toplinska vrijednost kalorimetrijske bombe. Mjerenjem povećanja temperature vode i kalorimetrijske bombe izračunava se gornja ogrjevna vrijednost ispitanog uzorka goriva. Izgaranjem uzorka goriva izgara i jedan dio od nikroma kojom je uzorak povezan na elektrode za paljanje. Stoga je potrebno od ukupne predane topline dobivene izgaranjem oduzeti toplinsku energiju predanu kalorimetrijskoj vodi koja je dobivena izgaranjem dijela žice.

Bilanca topline kalorimetrijske bombe:

$$M_g H_g = (W_w + W_b) \cdot \Delta\theta - Q_h \text{ [kJ]} \quad 4.1$$

$$H_g = \frac{(W_w + W_b) \cdot \Delta\theta - Q_h}{M_g} \quad 4.2$$

$H_g$  – gornja ogrjevna moć goriva [kJ/kg]

$M_g$  – masa uzorka goriva dobivena mjerenjem [kg]

$W_w$  – toplinski kapacitet vode [kJ/K]

$W_b$  – toplinski kapacitet vode [kJ/K]

$\Delta\theta$  – razlika ustaljenih temperatura vode izmjerenih prije i nakon kalorimetriranja [K]

$Q_h$  – toplina koja se oslobađa izgaranjem otporne žice od nikroma [kJ]

Toplinski kapacitet vode:

$$W_w = M_w \cdot c_w \text{ [kJ/K]} \quad 4.3$$

Masa vode:

$$M_w = M_{uk} - M_p \text{ [kg]} \quad 4.4$$

Toplina koja se oslobađa izgaranjem dijela žice  $Q_h$ :

$$Q_h = M_z \cdot q_z \quad 4.5$$

$$q_z = 6698 \text{ kJ/kg}$$

$M_z$  – masa izgorenog dijela žice [kg]

$q_z$  – toplina koju oslobodi žica po kg mase [kJ/kg]

$M_p$  – masa posude

$M_{uk}$  – masa posude s vodom

Masa izgorenog dijela žice:

$$M_z = M_0 - M_{ost} = m_0 \cdot l_0 - M_{ost} \quad 4.6$$

$M_0$  – masa žice uzorka [kg]

$m_0$  – specifična linearna masa žice [kg/cm]

$$m_0 = 0,8 \text{ mg/cm} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}$$

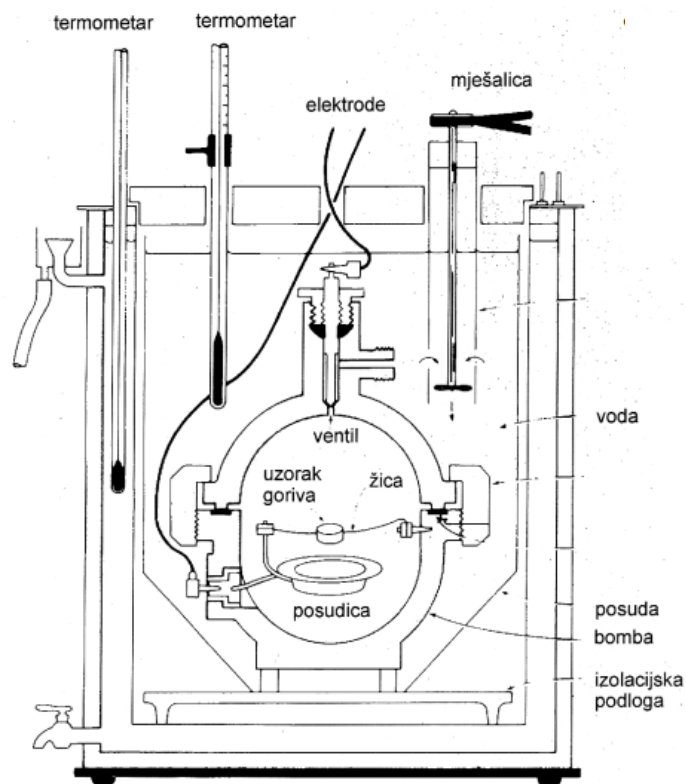
$l_0$  – početna duljina žice [cm] – 10 cm

$M_{ost}$  – masa preostalog dijela žice [kg]

#### 4.1 Opis pripreme za kalorimetriranje

Prije početka mjerenja potrebno je obaviti pripremu uzorka goriva za koje želimo utvrditi ogrjevnu vrijednost. Uzorak goriva se postavlja na maleni pladanj kroz koji je provučen komad žice i konca za koje imamo poznate ogrjevne vrijednosti kako bi ih oduzeli od izmjerene vrijednosti. Kalorimetrijsku bombu u kojoj se nalazi uzorak goriva potrebno je natlačiti na 20 bara.

Unutar limene posude koja je napunjena vodom uronimo kalorimetrijsku bombu. Kako bi se izbjegle razlike u temperaturi vode u pojedinim dijelovima posude, ugrađena je i mješalica čiji je zadatak ujednačavanje temperature. S druge strane, uronjen je i termometar koji koristimo za očitavanje temperatura tijekom određenog vremenskog razdoblja. Slika 4.2 prikazuje presjek unutrašnjosti kalorimetrijske bombe gdje je označena pozicija termometra i miješalice, te uzorak goriva u kalorimetrijskoj bombi koju smo uronili limenu posudu.



Slika 4.2 Presjek unutrašnjosti kalorimetrijske bombe



## 5 LABORATORIJSKA MJERENJA I ANALIZA REZULTATA

U nastavku rada biti će prikazani postupci, dobiveni rezultati i usporedba provedenih laboratorijskih vježbi.

### 5.1 Opis kalorimetriranja

Za prvo laboratorijsko mjerenje uzelo se korišteno jestivo suncokretovo ulje iz kućne upotrebe. Prije početka mjerenja potrebno je pripremiti opremu i instrumente koji su potrebni za izvođenje mjerenja što je i prikazano na slici 5.1.



*Slika 5.1 Priprema za laboratorijsko mjerenje*

Slika 5.1 prikazuje posudu u koju se uranja kalorimetrijska bomba, mjerni uređaj koji je tijekom mjerenja povezan s termometrom, vaga za određivanje vrijednosti mase posuda te poklopac kalorimetrijske bombe na postolju radi jednostavnosti pozicioniranja uzorka goriva i žice.

Sljedeći korak je pripremiti 2 litre vode koja se ulije u posudu koja je na slici 5.2. Na poklopcu posude nalazi se miješalica koju pokreće motorić s lijeve strane te termometar.



*Slika 5.2 Posuda za kalorimetrijsku bombu*

## **5.2 Priprema uzorka goriva**

Koristeći vagu provjeri se masa prazne posude nakon čega se u istu ulije 2 litre vode. Za mjerenje mase uzorka goriva koristi se druga vaga koju smo prethodno kalibrirali kako bi poništili masu posudice u koju smo prethodno stavili nekoliko kapljica ulja. Slika 5.3 prikazuje mjerenje mase uzorka korištenog suncokretovog ulja koje se nalazi u crnoj posudici.



*Slika 5.3 Mjerenje mase uzorka goriva*

U tablici 5.1 navedene su mase koje je bilo potrebno izmjeriti i vrijednosti, te duljina žice od nikroma.

*Tablica 5.1 Podaci o masi prije mjerenja*

Masa prazne posude	783 g
Masa posude s vodom	2.786 g
Masa vode	2.003 g
Masa uzorka goriva	7.909 g
Duljina žice od nikroma	100 mm

Slika 5.4 prikazuje stalak na kojem se nalazi poklopac kalorimetrijske bombe. U ovom dijelu postupka pozicioniramo crnu posudicu koja sadrži ulje tako da ćemo kroz dvije elektrode posudice provući 10 cm dugu žicu od nikroma. Oko sredine žice, odnosno iznad posudice omotamo 10 cm pamučnog konca čiji su vrhovi u ulju. Potrebno je pripaziti da žica ne dodiruje ulje, dok bi konac trebao vrhovima biti u ulju. Nakon toga poklopac može se zatvoriti kalorimetrijska bomba te pri tome paziti da se pri pozicioniranju na kućište ne odvoji žica od uzorka ulja.



*Slika 5.4 Poklopac kalorimetrijske bombe s pripremljenim uzorkom goriva*

### 5.3 Priprema kalorimetrijske bombe

Sljedeći korak uključuje bocu kisika koja se koristi kako bi smo podignuli tlak kalorimetrijskoj bombi na 23 bara. Unutar boce s kisikom vlada tlak od oko 60 bara. Pri postupku propuhivanja i tlačenja kalorimetrijske bombe preporuča se koristiti zaštitne naočale kao sigurnost. Nakon što spojimo cjevčicom bombu i bocu s kisikom prvom propušemo kako bi ispustili zrak kroz otvoreni ventil. Nakon toga zatvara se ventil kalorimetrijske bombe i punimo bombu s kisikom. Slika prikazuje bocu s kisikom koja se cjevčicom spoji na ventil kalorimetrijske bombe.



*Slika 5.5 Definiranje tlaka kalorimetrijske bombe pomoću boce s kisikom*

Preostaje samo još smjestiti kalorimetrijsku bombu u posudu s vodom te započeti proces. Koristeći hvataljke kalorimetrijsku bombu premještamo u posudu koja je prema prethodnoj proceduri napunjena vodom te pozicioniramo bombu u točno određeni položaj. Slika 5.6 prikazuje kalorimetrijsku bombu unutar posude koja se zatvori s poklopcem.



*Slika 5.6 Posuda s vodom i kalorimetrijskom bombom*

#### **5.4 Rezultati mjerenja ogrjevnosti tablete za kalibraciju**

Prije mjerenja ogrjevnosti uzoraka napravila se kalibracija kalorimetra kako bi se proračunom dobila vrijednost konstante koja će se koristiti za daljnje proračune. Postupak kalibracije kalorimetra provodi se uz korištenje tablete beznojeve kiseline. Tablica 5.2 prikazuje porast temperature tijekom vremena kao rezultat izgaranja tablete za kalibraciju.

Tablica 5.2 Rezultati mjerenja

Vrijeme,s	Temperatura, $t_w$ : °C
0:00	19.320
1:00	19.311
2:00	19.304
2:15	19.304
2:30	19.302
2:45	19.300
3:00	19.299
3:15	19.300
3:30	19.339
3:45	19.502
4:00	19.952
4:15	20.217
4:30	20.572
4:45	20.836
5:00	21.037
5:15	21.171
5:30	21.328
5:45	21.425
6:00	21.526
6:15	21.583
6:30	21.641
6:45	21.700
7:00	21.720
7:15	21.754
7:30	21.774
7:45	21.798
8:00	21.814
8:15	21.834
8:30	21.845
8:45	21.849
9:00	21.863
9:15	21.863
9:30	21.868
9:45	21.872
10:00	21.876
10:15	21.877
10:30	21.878
10:45	21.879
11:00	21.882
11:15	21.881
11:30	21.881
11:45	21.880
12:00	21.879
12:15	21.877
12:30	21.876
12:45	21.874
13:00	21.874
13:30	21.871
14:00	21.868
14:30	21.865
15:00	21.862
15:30	21.857

Bilanca topline kalorimetrijske bombe iznosi:

$$m_g \cdot h_g + Q_z + Q_k = (W_w + W_b) \cdot \Delta T \quad 5.1$$

Gornja ogrjevna moć goriva:

$$H_g = \frac{(W_w + W_b) \cdot \Delta T - Q_z - Q_k}{m_g} \quad 5.2$$

U formuli 5.2 nepoznata vrijednost koja će se dobiti u proračunu u nastavku je toplinski kapacitet kalorimetrijske bombe te se dobivena vrijednost koristi u daljnjim proračunima. Gornja ogrjevna moć kalibracijske tablete  $H_g$  je preuzeta iz tehničkih podataka.

Podaci koji su potrebni za proračun:

Masa uzorka kalibracijske tablete,  $m_g$  : 0,0010124 kg

Specifični toplinski kapacitet vode pri 20°C,  $c_w$ : 4,184 kJ/kgK

Masa vode  $m_w$  : 2 kg

Gornja ogrjevna moć kalibracijske tablete  $H_g$ : 26454 kJ/kg

Toplina oslobođena izgaranjem pamučnog konca  $Q_k$ : 0,05 kJ

Specifična toplina žice od nikroma  $q$ : 0,0096 kJ/cm

Početna duljina žice od nikroma  $l_0$ : 10 cm

Duljina izgorenog dijela žice od nikroma  $l_{UZORAK}$ : 10 cm

Izmjerena duljina ostatka žice  $l_{OSTATAK}$ : 3,2 cm

Izmjereni porast temperature:

$$\Delta T = 21,882 - 19,229 = 2,653 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad 5.3$$

Toplinski kapacitet vode:

$$W_w = m_w \cdot c_w = 2 \cdot 4,184 = 8,368 \text{ [kJ/kg]} \quad 5.4$$

Toplina oslobođena izgaranjem žice od nikroma:

$$Q_z = q_{spec,z} \cdot l_{izg} = 0,0096 \cdot 3,2 = 0,03072 \text{ [kJ]} \quad 5.5$$

Prema navedenom gornja ogrjevna moć goriva jednaka je:

$$W_b = \frac{H_g \cdot m_g + Q_z + Q_k}{\Delta T} - W_w$$

$$W_b = \frac{26454 \cdot 0,0010124 + 0,03072 + 0,05}{2,653} - 8,368$$

$$W_b = 1,757 \text{ [kJ/K]}$$

### 5.5 Rezultati prvog mjerenja ogrjevnosti otpadnog suncokretovog ulja

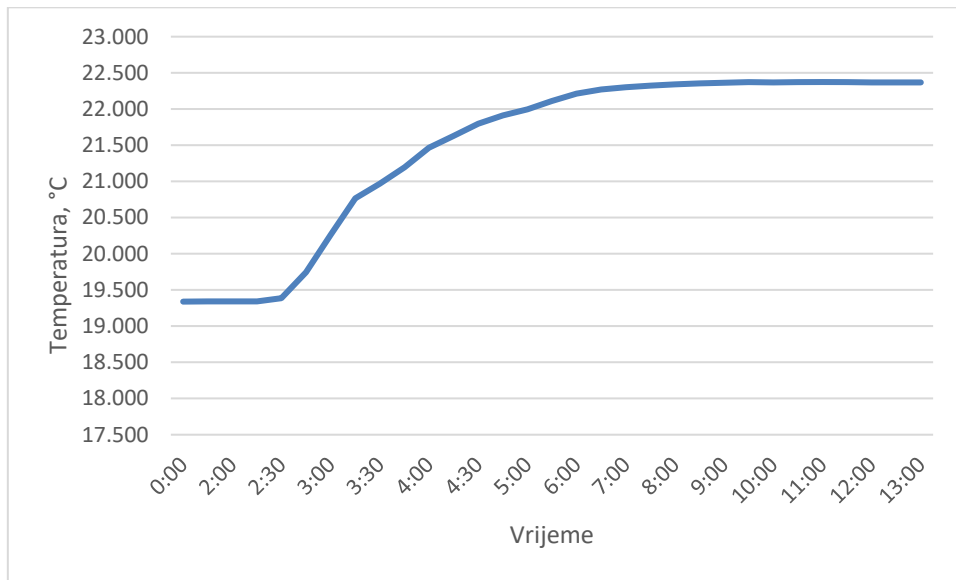
U tablici prikazane su vrijednosti temperatura i vrijeme u minutama. Nakon što se pokrene miješalica prve dvije minute se pričekaju te nakon toga se pritisne dugme kojim započinje proces paljenja goriva i izgaranja. Nakon druge minute kada je gorivo zapaljeno bilježi se porast temperature vode.

Tablica 5.3 Rezultati prvog mjerenja

Vrijeme,s	Temperatura,tw: °C
0:00	19.339
1:00	19.340
2:00	19.340
2:15	19.340
2:30	19.385
2:45	19.743
3:00	20.263
3:15	20.765
3:30	20.970
3:45	21.197
4:00	21.463
4:15	21.630
4:30	21.795
4:45	21.910
5:00	21.995
5:30	22.113
6:00	22.211
6:30	22.268
7:00	22.300
7:30	22.322
8:00	22.343
8:30	22.355
9:00	22.365
9:30	22.370
10:00	22.369
10:30	22.370
11:00	22.373
11:30	22.370
12:00	22.369
12:30	22.368
13:00	22.367



Tablični rezultati prikazani su i na slici 5.7 krivuljom koja vizualno prikazuje promjenu temeprature odnosno njezin porast kao posljedica izgaranja goriva. Prateći krivulju mogu se razlikovati tri faze promjene temperature. Prva faza je stacionarna koja se odvija prije paljenja bombe, u drugoj fazi krivulja se penje odnosno bilježi se porast temperature kao posljedica paljenja, sve do ustaljivanja krivulje. Treća faza je stacionarno stanje koja nastupa nakon što temperatura prestane rasti.



*Slika 5.7 Krivulja porasta temperature prvog mjerenja*

Dobiveni rezultati koriste se za izračunavanje ogrjevnice goriva.

Bilanca topline kalorimetrijske bombe iznosi:

$$m_g \cdot h_g + Q_{\dot{z}} + Q_k = (W_w + W_b) \cdot \Delta T \quad 5.7$$

Gornja ogrjevnica goriva:

$$H_g = \frac{(W_w + W_b) \cdot \Delta T - Q_{\dot{z}} - Q_k}{m_g} \quad 5.8$$

Podaci koji su potrebni za proračun:

Masa uzorka,  $m_g$  : 0,0007909s kg

Specifični toplinski kapacitet vode pri 20°C: 4,184 kJ/kgK

Masa vode  $m_w$  : 2 kg

Toplinski kapacitet kalorimetrijske bombe  $W_b$ : 1,757 kJ/K

Toplina oslobođena izgaranjem pamučnog konca  $Q_k$ : 0,05 kJ

Specifična toplina žice od nikroma  $q$ : 0,0096 kJ/cm

Početna duljina žice od nikroma  $l_0$ : 10 cm

Duljina izgorenog dijela žice od nikroma  $l_{UZORAK}$ : 10 cm

Izmjerena duljina ostatka žice  $l_{OSTATAK}$ : 4,2 cm

Izmjereni porast temperature:

$$\Delta T = 22,373 - 19,339 = 3,034 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad 5.9$$

Toplinski kapacitet vode:

$$W_w = m_w \cdot c_w = 2 \cdot 4,184 = 8,368 \text{ [kJ/kg]} \quad 5.10$$

Toplina oslobođena izgaranjem žice od nikroma:

$$Q_{\dot{z}} = q_{\text{spec,}\dot{z}} \cdot l_{\text{izg}} = 0,0096 \cdot 4,2 = 0,04032 \text{ [kJ]} \quad 5.11$$

Prema navedenom gornja ogrjevna moć goriva jednaka je:

$$H_g = \frac{(W_w + W_b) \cdot \Delta T - Q_{\dot{z}} - Q_k}{m_g} \quad 5.12$$

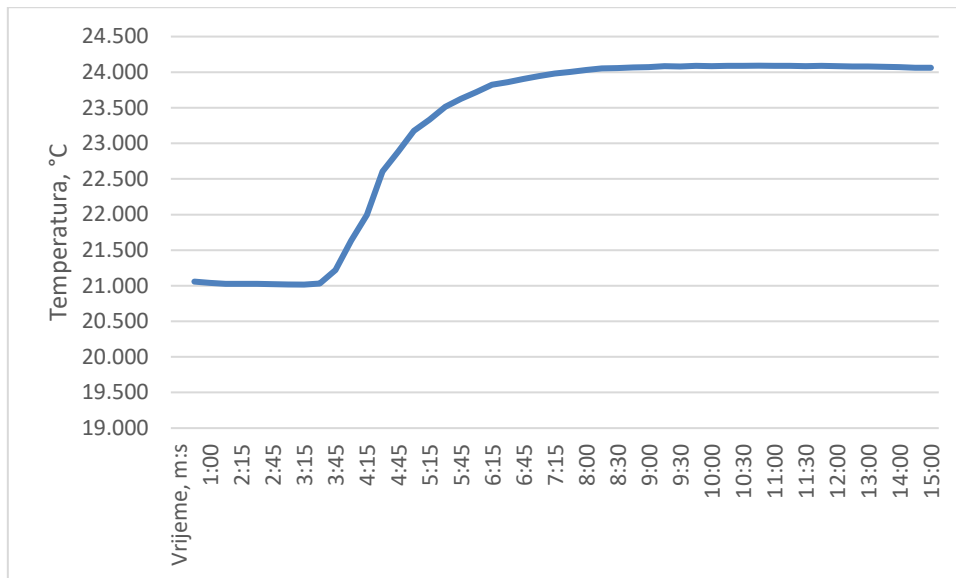
$$H_g = \frac{(8,368 + 1,757) \cdot 3,034 - 0,04032 - 0,05}{0,0007909}$$

$$H_g = 38726,678 \text{ [kJ/kg]}$$

## 5.6 Rezultati drugog mjerenja ogrjevne vrijednosti otpadnog suncokretovog ulja

Tablica 5.4 Rezultati drugog mjerenja

Vrijeme, s	$t_w, ^\circ C$
0:00	21,058
1:00	21,040
2:00	21,028
2:15	21,028
2:30	21,028
2:45	21,021
3:00	21,018
3:15	21,016
3:30	21,033
3:45	21,221
4:00	21,633
4:15	21,995
4:30	22,607
4:45	22,883
5:00	23,178
5:15	23,333
5:30	23,513
5:45	23,626
6:00	23,720
6:15	23,822
6:30	23,858
6:45	23,903
7:00	23,945
7:15	23,979
7:30	24,004
8:00	24,030
8:15	24,052
8:30	24,059
8:45	24,065
9:00	24,073
9:15	24,084
9:30	24,082
9:45	24,087
10:00	24,086
10:15	24,089
10:30	24,087
10:45	24,091
11:00	24,088
11:15	24,090
11:30	24,086
11:45	24,088
12:00	24,086
12:30	24,081
13:00	24,079
13:30	24,074
14:00	24,069
14:30	24,064
15:00	24,061



Slika 5.8 Krivulja porasta temperature drugog mjerenja

Izmjereni porast temperature:

$$\Delta T = 24,091 - 21,016 = 3,075 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad 5.13$$

Toplinski kapacitet vode:

$$W_w = m_w \cdot c_w = 2 \cdot 4,184 = 8,368 \text{ [kJ/kg]} \quad 5.14$$

Toplina oslobođena izgaranjem žice od nikroma:

$$Q_{\dot{z}} = q_{spec,\dot{z}} \cdot l_{izg} = 0,0096 \cdot 3 = 0,0288 \text{ [kJ]} \quad 5.15$$

Prema navedenom gornja ogrjevna moć goriva jednaka je:

$$H_g = \frac{(W_w + W_b) \cdot \Delta T - Q_{\dot{z}} - Q_k}{m_g} \quad 5.16$$

$$H_g = \frac{(8,368 + 1,757) \cdot 3,075 - 0,0288 - 0,05}{0,0008089}$$

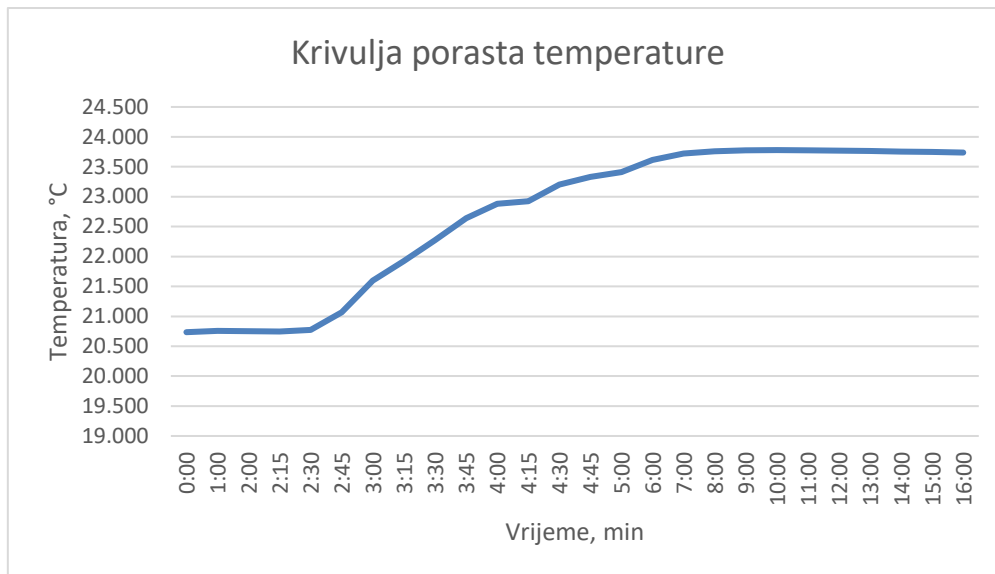
$$H_g = 38293,3538 \text{ [kJ/kg]}$$

## 5.7 Rezultati trećeg mjerenja ogrjevnosti otpadnog ulja iz domaćinstva

U nastavku je proračun i analiza rezultata mjerenja ogrjevnosti korištenog suncokretovog ulja iz domaćinstva.

Tablica 5.5 Rezultati trećeg mjerenja

Vrijeme, s	$t_w, ^\circ C$
0:00	20,735
1:00	20,759
2:00	20,750
2:15	20,748
2:30	20,773
2:45	21,067
3:00	21,596
3:15	21,926
3:30	22,273
3:45	22,638
4:00	22,879
4:15	22,926
4:30	23,205
4:45	23,331
5:00	23,411
6:00	23,617
7:00	23,722
8:00	23,759
9:00	23,773
10:00	23,779
11:00	23,776
12:00	23,772
13:00	23,762
14:00	23,755
15:00	23,749
16:00	23,740



Slika 5.9 krivulja porasta temperature trećg mjerenja

Izmjereni porast temperature:

$$\Delta T = 23,779 - 20,735 = 3,044 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad 5.17$$

Toplinski kapacitet vode:

$$W_w = m_w \cdot c_w = 2 \cdot 4,184 = 8,368 \text{ [kJ/kg]} \quad 5.18$$

Toplina oslobođena izgaranjem žice od nikroma:

$$Q_{\dot{z}} = q_{spec,\dot{z}} \cdot l_{izg} = 0,0096 \cdot 3,5 = 0,0366 \text{ [kJ]} \quad 5.19$$

Prema navedenom gornja ogrjevna moć goriva jednaka je:

$$H_g = \frac{(W_w + W_b) \cdot \Delta T - Q_{\dot{z}} - Q_k}{m_g} \quad 5.20$$

$$H_g = \frac{(8,368 + 1,757) \cdot 3,044 - 0,0288 - 0,05}{0,0007935}$$

$$H_g = 38741,9029 \text{ [kJ/kg]}$$

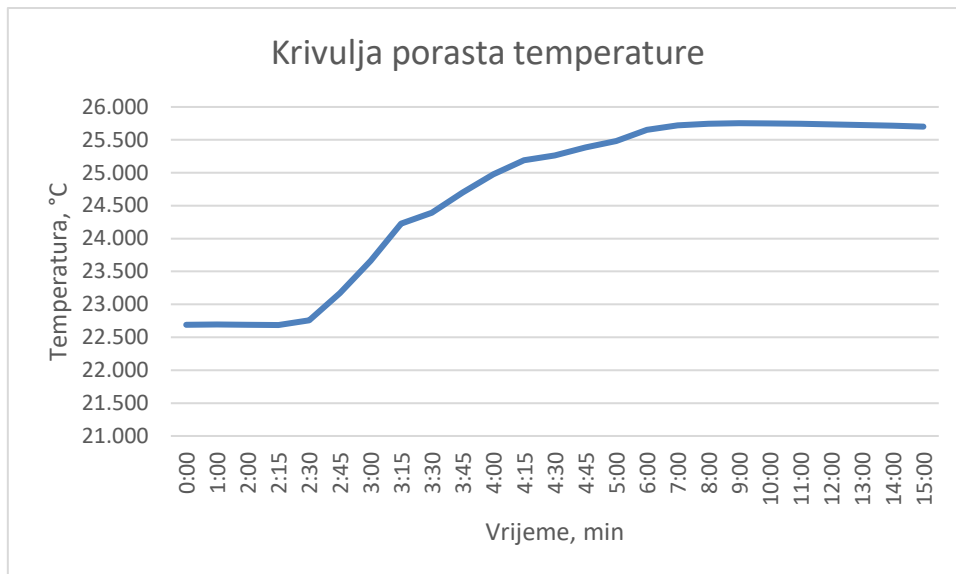
## 5.8 Rezultati četvrtog mjerenja ogrjevnosti vrijednosti otpadnog ulja iz restorana

Za usporedbu rezultata mjerenja ogrjevnosti korištenog ulja iz domaćinstva, nabavljen je i uzorak otpadnog ulja iz restorana. Tablica 5.6 prikazuje promjenu temperature tijekom vremena.

Tablica 5.6 Rezultati četvrtog mjerenja

Vrijeme, s	$t_w$ , °C
0:00	22,690
1:00	22,693
2:00	22,688
2:15	22,686
2:30	22,757
2:45	23,170
3:00	23,663
3:15	24,229
3:30	24,391
3:45	24,700
4:00	24,977
4:15	25,188
4:30	25,261
4:45	25,384
5:00	25,481
6:00	25,654
7:00	25,72
8:00	25,746
9:00	25,753
10:00	25,749
11:00	25,744
12:00	25,734
13:00	25,724
14:00	25,713
15:00	25,702

Slika 5.10 prikazuje krivulju porasta temperature. Tijekom prve 2 minute odvijalo se samo miješanje vode bez paljenja goriva. U vremenu 2:00 je zapaljeno gorivo, nakon čega se događa nagli porast temperature kao posljedica otpuštanja topline uslijed izgaranja.



Slika 5.10 Krivulja porasta temperature četvrtog mjerenja

Izmjereni porast temperature:

$$\Delta T = 25,753 - 22,686 = 3,067 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad 5.21$$

Toplinski kapacitet vode:

$$W_w = m_w \cdot c_w = 2 \cdot 4,184 = 8,368 \text{ [kJ/kg]} \quad 5.22$$

Toplina oslobođena izgaranjem žice od nikroma:

$$Q_{\dot{z}} = q_{spec,\dot{z}} \cdot l_{izg} = 0,0096 \cdot 3,3 = 0,03168 \text{ [kJ]} \quad 5.23$$

Prema navedenom gornja ogrjevna moć goriva jednaka je:

$$H_g = \frac{(W_w + W_b) \cdot \Delta T - Q_{\dot{z}} - Q_k}{m_g} \quad 5.24$$

$$H_g = \frac{(8,368 + 1,757) \cdot 3,067 - 0,03168 - 0,05}{0,0008078}$$

$$H_g = 38340,795 \text{ [kJ/kg]}$$



## 6 PROIZVODNJA BIODIZELA

Biodizel ili skraćeno FAME (metil ester masnih kiselina) je produkt koji se dobiva procesom transesterifikacijske reakcije sirovina kao što su biljno ulje, otpadno jestivo ulje ili životinjske i alkohola (metanola, etanola) pomoću katalizatora (kalijev hidroksid).

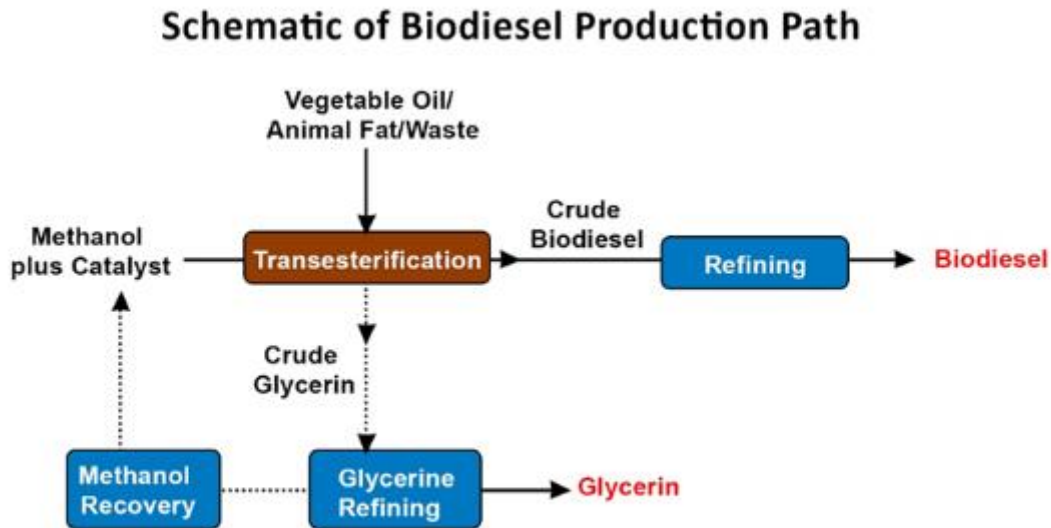


FIG. BIODIESEL PRODUCTION PROCESS FLOW

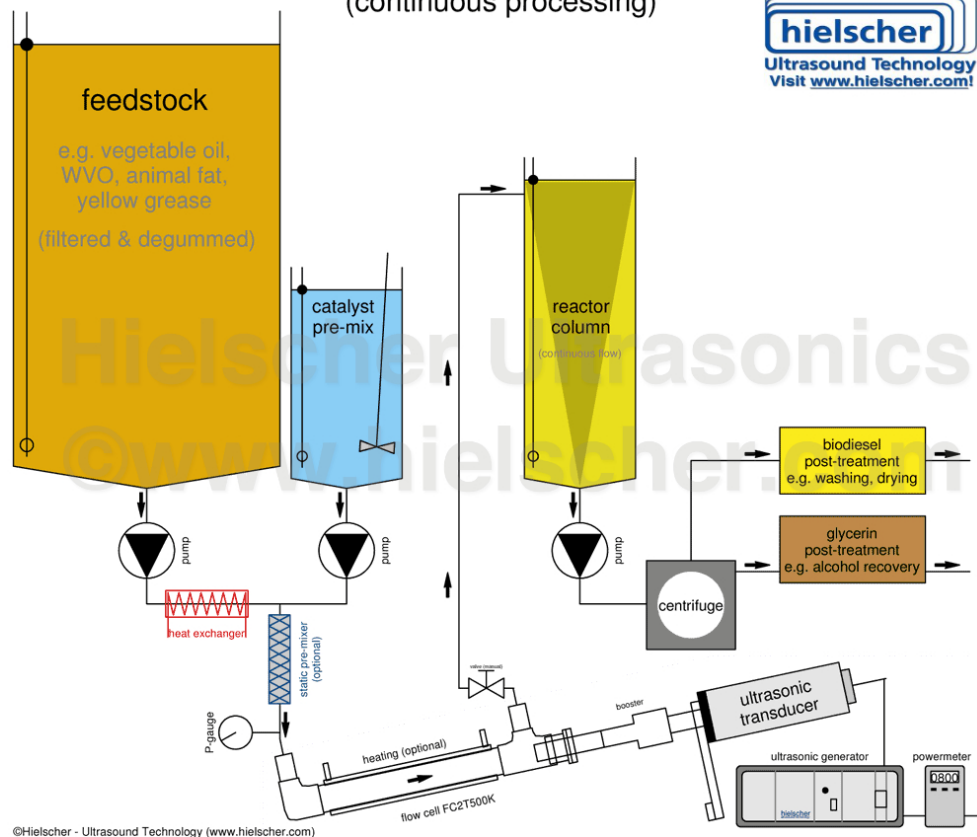
Slika 6.1 Shematski prikaz proizvodnje biodizela [3]

Konvencionalna proizvodnja biodizela miješanjem oba reaktanta transesterifikacijske reakcije ulja i alkohola dovodi do neučinkovite pretvorbe biodizela koja se karakterizira produženim vremenom reakcije, visokih zahtjeva katalizatora, visokih temperatura procesa te visoke stope miješanja. Svi navedeni čimbenici utječu i na povećanje troškova proizvodnje biodizela što na kraju dovodi do ishoda da će se izbjegavati implementacija ovakvog rješenja alternativnog goriva.

S druge strane, ultrazvučno miješanje emulgira reaktante na puno učinkovitiji način što dovodi do poboljšanog miješanja smanjanja zahtjeva katalizatora, smanjenje vremena i temperature reakcije, uštede resursa (kemikalija i energije), smanjenje troškova te se povećava kvaliteta i profitabilnost proizvodnje biodizela.

Proizvođači industrijskog biodizela potvrđuju da je proces ultrazvučnog miješanja isplativ način proizvodnje te na smanjenje kvalitete ovog procesa ne utječe ni u slučajevima korištenja ulja lošije kvalitete. Ovakva proces smanjenju korištenje viška metanola i katalizatora te omogućuje proizvodnju biodizela koja je u skladu sa standardima kvalitete ASTM D6751 i EN 14212.

## Biodiesel Conversion Using Ultrasonication (continuous processing)



Slika 6.2 Dijagram toka ultrazvučnog procesa proizvodnje biodizela [4]

Dodavanjem određenog postotka biodizela konvencionalnom dizelu može poboljšati svojstvo kao što je mazivost [5]. Moguća je i primjena čistog biodizela (B100) ili primjena goriva koja se miješaju u različitim udjelima s biodizelom, pa tako razlikujemo:

- B0 (dizelsko gorivo bez dodanog biodizela)
- B2, B5 (eurodizel)
- B10, B20

Općenito, koristi se oznaka BX, kako bi se definirao udio biodizela u smjesi goriva.

Mogući nedostaci koji prate korištenje biodizela su manja radna snaga motora (5-9 %) te nešto veća potrošnja kisika (7-10 %). Uz to, biodizel prati i veća viskoznost u odnosu na fosilni dizel što rezultira lošijim fizikalno-kemijskim svojstvima na niskim temperaturama. Također, biodizel je kemijski reaktivan kada dođe u kontakt s gumenim i plastičnim materijalima koja se mogu pronaći u elementima sustava goriva te kao posljedica može dovesti do malo češće zamjene filtera i ulja.

## 7 PRIMJENA ENERGIJE IZ OTPADNOG JESTIVOG ULJA

Svrha prethodno provedenih eksperimentalnih mjerenja ogrjevne moći jestivog otpadnog ulja je zapravo analiza njegove primjene. Postoji više rješenja kako bi se otpadno jestivo ulje nakon reciklaže moglo ponovno iskoristiti, a neka od njih su: proizvodnja biogoriva, sapuna, sintetskih guma i deterdženta. Trenutno u svijetu već postoje pogoni za reciklažu velikih količina otpadnog jestivog ulja koje se dalje može ponovno koristiti kao primjerice biogorivo.

S obzirom na trenutno razdoblje u svijetu koje je sve više teži k pronalasku alternativnih rješenja za zamjenu nafte čije su količine ograničene, kao jedno od mogućih rješenja kroz ovaj rad analizirat će se biogorivo. Prema definiciji biogoriva su sva goriva koja se mogu dobiti preradom biomase. Primjena ovakvog alternativnog rješenja, koja je od velikog značaja zbog potrebe za očuvanjem okoliša, predstavlja važan strateški i ekonomski interes u proizvodnji istog.

Prvi produkti koji spadaju pod biogoriva dobivala su se od šećera, škroba, životinjskih masti i biljnog ulja.

### 7.1 Ugostiteljski lanci

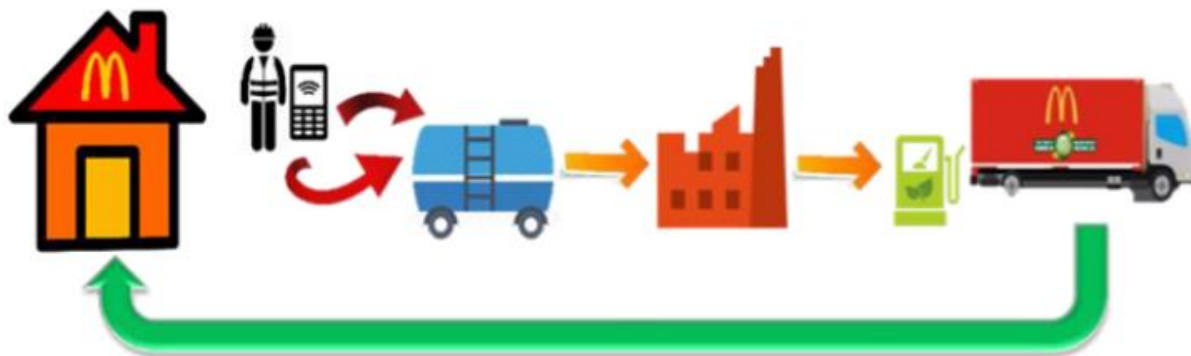
Veliki ugostiteljski lanci brze hrane susreću se velikim količinama otpadnog jestivog ulja. Kao jedna od primjera navodi se poznata globalna franšiza McDonald's koja svoje otpadno ulje reciklira te ponovno koristi kao pogon za motorna vozila kojima vrše dostavu sirovina [6].

## Biodiesel Initiative



*Slika 7.1 McDonald's-ov program korištenja biogoriva*

Otpadnog jestivo ulje iz McDonald's-ovih restorana transportira se za reciklažu i proizvodnju biogoriva koje kasnije njihovi kamioni koriste umjesto nafte. Implementacijom ovakvog rješenja postaju sudionici u korištenju alternativnih rješenja za naftu.



Slika 7.2 Kružni proces korištenja otpadnog jestivog ulja [7]

Hardcastle Restaurants (HRPL), kao glavna franšiza McDonald's-a koje se nalazi u zapadnoj i južnoj Indiji, pokrenula je svoj program korištenja biodizela nastalog od otpadnog jestivog ulja za svoja dostavna vozila. Svaki mjesec, ovaj lanac proizvede 35 000 litara otpadnog jestivog ulja koje se dalje reciklira za proizvodnju biogoriva. Ovakav proces se može definirati i kao kružni proces kojeg čine nekoliko faza:

1. Otpadno jestivo ulje se skuplja u posebno projektiranim spremnicima te se šalje u jedinicu za preradu gdje se taloži
2. Proces podizanja lakših čestica na vrh i taloženje ostatka na dno
3. Zagrijavanje ulja – uklanjanje vode i krutih čestica (proces esterifikacije)
4. Filtriranje i destiliranje

Nakon što ulje prođe sve faze navedenog ciklusa prerade, što otprilike traje između 6 i 8 sati, dobije se konačan produkt odnosno biodizel koji se koristi za pogon dostavnih kamiona.

S obzirom na jedan primjer uspješnog iskorištavanja otpadnog jestivog ulja, čime se ostvaruje dvostruka dobit jer se ne mora zbirnjavati otpadno ulje i smanjuje se korištenje nafte, postavlja se pitanje koliko je moguće ovakvu ideju implementirati i na druge grane koje se klasificiraju kao potrošači dizela i veliki zagađivači [8].

## 7.2 Pomorski transport

Nedostatak energije, onečišćenje okoliša, zabrinutost zbog promjenjivih cijena predstavljaju glavne probleme s kojima se pomorski transport danas susreće. Brodovi pridonose veliki značaj tržišnoj logistici te putničkom prijevozu. Ako bi se preciznije definiralo, 90 % međunarodne trgovine odvija se putem preookeanskih brodova što za sobom nosi nekoliko važnih tema kao što su velika potrošnja goriva i emisije štetnih plinova.

S obzirom na tehničke zahtjeve, gorivo koje se koristi za brodove trebalo bi zadovoljavati tehničku izvedivost, ekonomsku isplativost, ekološku prihvatljivost te dostupnost. Upotreba biogoriva bi mogla biti jedan od najbrže rastućih oblika alternativnog goriva. Nastavno tome, međunarodna pomorska organizacija (IMO – International Maritime Organization) donijela je inicijalnu strategiju za smanjenje emisije stakleničkih plinova s brodova, koja postavlja za cilj smanjenje emisija za najmanje 50 % u 2050. godini u odnosu na 2008. godinu kada je usvojena.

Upotreba biogoriva kao glavnog izvora za brodove do sada se uglavnom koristila u pilot projektima, stoga još uvijek izostaje značajnija upotreba u komercijalnim razmjerima te je trenutno ograničena na 0,1 % konačne potrošnje energije.

Primjer pilot projekta gdje se otpadno jestivo ulje koristilo kao sirovina za biogorivo, a isto je prethodno bilo korišteno na brodovima su trajekti tvrtke „Washington State Ferries“ sa startom projekta u 2013. godini.

U 2017. godini, dobavljač goriva „GoodFuels“ je pokrenuo „GoodShipping“ program čiji je cilj osigurati goriva iz obnovljivih izvora za sve oceanske brodove.

Kontejnerski brod Mette Maersk je u povratnoj plovidbi 2019. godine, na ruti između Rotterdama i Šangaja plovio na mješavini goriva s čak 20 % biogoriva kao produkta nastalog od otpadnog jestivog ulja. Ovo je bio prvi primjer mješavine u tolikom omjeru s otpadnim uljem korištenim unutar istog kontejnerskog broda.

Dizel motorima upravo pogoduju prirodne značajke biogoriva kao što su visoka točka paljenja, biorazgradivost, poboljšani cetanski broj te smanjenje emisije štetnih dimnih plinova. Također, biogorivo se može koristiti i u kombinaciji s konvencionalnim dizelom pri čemu nastaje mješavina pod nazivom BXX (Biodiesel blend) te oznaka XX definira volumen postotka biogoriva u smjesama. Najčešće korišteni su B5 (sadrži i do 5 % biodizela), B20 (sadrži između 6 % i 20 % biodizela) i B100 (čisti biodizel). Ove prednosti je iskoristio i MAN Energy Solutions te je prošle godine objavio da je njihov motor MAN 175D sada i službeno odobren

za pogon na biogorivo. Za njeov rad moguće je korištenje svih standardnih biogoriva, kao što je hidrogenirano biljno ulje i estere metilnih masnih kiselina.



*Slika 7.3 Motor MAN 175D s pogonom na biogoriva [9]*

MAN 175D motor postoji u tri varijante s 12,16 i 20 cilindara te promjerom cilindra od 175 mm. Izlazne snaga je u rasponu od 1500 kW DO 4400 kW PRI 1500 DO 2000 o/min. Optimiziran je za pogon trajekta, tegljača i drugih radnih brodova [10].

Tvrtka MAN Energy Solutions već duži vremenski period priprema svoje motore za rad na održiva goriva te nekoliko njihovih motora već uspješno radi na do B30 biogorivu bez gubitka performansi. Zbog dizajna, samo nekoliko komponenti motora podložno je nešto većem habanju, ovisno o količini biogoriva i trajanju rada.

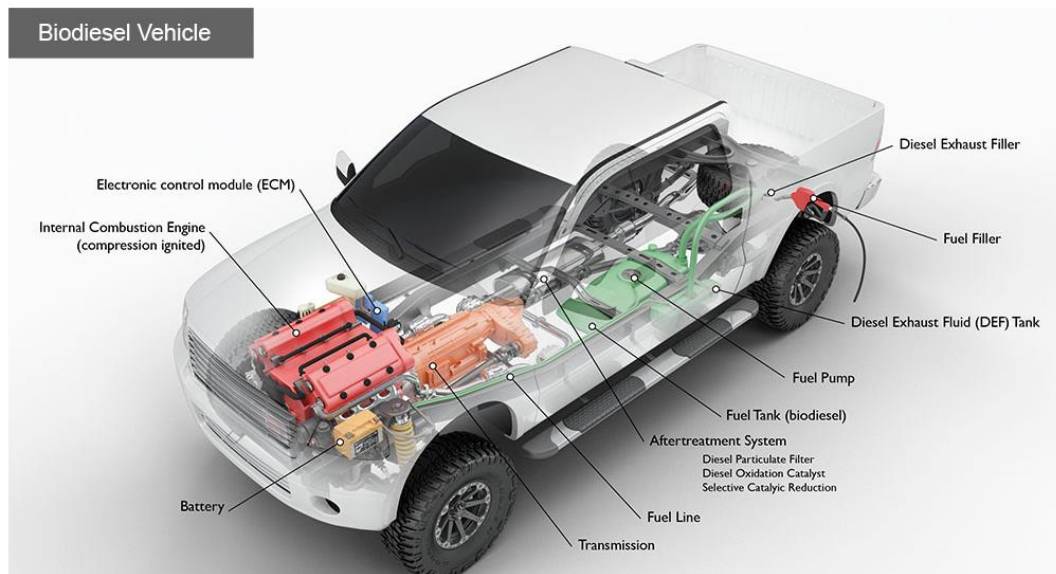
S obzirom na niži energetska sadržaj FAME goriva, MAN Energy Solutions je osigurao da maksimalna kontinuirana snaga motora (MCR) ne opadne primjenom rješenja koje omogućava korekciju opterećenja pomoću kontrole prilagodbe goriva. S ovakvim radom, motor može koristiti i 100 %-tno FAME gorivo [11].

### **7.3 Proces rada motora s pogonom na biodizel**

Automobili koji kao pogon koriste biodizel ili konvencionalni dizel su u principu ista vozila s istim principom rada. Koriste motor s unutarnjim izgaranjem i iste komponente. Neki proizvođači originalne opreme za automobile strogo zabranjuju korištenje biodizela kao čistog izvora goriva ili miješanjem u količinama većim od dozvoljenih. Odnosno, određeni



proizvođači imaju jasno naglašenu politiku u kojoj eventualni kvarovi nastali korištenjem biodizela poništavaju vrijednost garancije vozila.



*Slika 7.4 Komponente vozila s biodizelom [12]*

1. Sustav obrade štetnih plinova: sastoji se od nekoliko komponenti koje filtriraju ispušne dimne plinove. Ispušni plinovi prolaze kroz filter dizelskih čestica (DPF) i katalizator radi smanjenja čestica, dodaje se tekućina za obradu ispušnih dimnih plinova (DEF) i ubrizgava u smjesu ispušnih plinova. Kemijskom reakcijom unutar selektivnog katalitičkog reduktora (SCR) stvara dušik i vodu prije ispuštanja u atmosferu.
2. Baterija: za osiguravanje električne energije koja pokreće motor i napaja elektroniku.
3. Spremnik tekućine za obradu ispušnih plinova (DEF): sadrži tekućinu za obradu dimnih plinova, vodenu ureu koja se ubrizgava u tok ispušnih dimnih plinova kroz SCR katalizator.
4. Priključak za punjenje tekućine za obradu ispušnih plinova (DEF)
5. Elektronički upravljački modul (ECM): upravlja smjesom goriva, paljenje u određenom trenutku te sustavom emisije. Također, nadzire rad vozila, štiti motor te prepoznaje problem.
6. Priključak za punjenje goriva
7. Linija goriva: metalna cijev čija je zadaća prijenos goriva motora
8. Pumpa goriva: prijenos goriva iz spremnika do sustava ubrizgavanja goriva
9. Spremnik goriva: u ovom slučaju pohrana biodizel goriva
10. Motor s unutarnjih izgaranjem
11. Prijenos snage: prijenos mehaničke energije motora na pogon kotača

## 8 ANALIZA TRŽIŠTA

Recikliranje i iskorištavanje energije otpadnog jestivog ulja nadovezuje se na jednu od glavnih tema današnjice, a tiče se globalne proizvodnje i opskrbe energijom, točnije štetan utjecaj fosilnih goriva te visoke cijene naftnih derivata. Kako bi se na tržištu postojeće sirovine zamijenili novima, potreban je niz razloga koji bi potkrijepili prednosti novog rješenja u odnosu na postojeće. U ovom slučaju, gledajući s ekonomskog stajališta cijena biogoriva koja bi zamijenila fosilna, trebala bi biti privlačna potrošačima. Prema brojnim napravljenim istraživanjima, globalna opskrba naftom i prirodnim plinom iz konvencionalnih izvora vjerojatno neće zadovoljiti rast potražnje za energijom u narednih 25 godina.

Procjenjuje se da oko 90 % ulja i masti koje se koriste u Europskoj uniji je biljnog podrijetla. Prema direktivi o obnovljivoj energiji, Europska unija je postavila cilj zaustaviti razvoj biogoriva iz hrane te postupno zaustaviti proizvodnju biogoriva iz palminog ulja zbog neizravnih posljedica koje nastaju ispuštanjem štetnih plinova. Sve veće ugljične emisije što se tiče ove teme nastaju kao posljedica širenja zemljišta kako bi se zadovoljila sve veća globalna potražnja za biogorivom. Kao rješenje predlaže se povećanje obnovljive energije u transportu iz biogoriva koja se mogu proizvesti iz otpadnih ulja i masti.

Otpadno jestivo ulje je u konačnici vrijedna sirovina koja može pronaći svoju višestruku primjenu na tržištu. U nekim zemljama ono se koristi kao hrana za životinje. Hranjivi sastojci koje je zadržalo nakon korištenja čine ga elementom stočne hrane. S obzirom na činjenicu da je već korišteno i bilo u kontaktu s hranom, prije ponovnog korištenja potrebno je ispuniti stroge sigurnosne kriterije kada je riječ o ljudskom prehrambenom lancu.

Osim navedenog, otpadnog jestivo ulje može se koristiti za kemijske i biološke procese. Primjerice može se preraditi u svrhu dobivanja pirolitičkog ulja koje se koristi kao izvor energije za proizvodnju plinovitog vodika. Još jedna njegova prednost je dobivanje produkata kao što su biomaziva, ljepila, smole i biorazgradivi polimeri preko kemijske transformacije.

Iako su s tehničkog pogleda moguće različite primjene otpadnog jestivog ulja, ipak prema nekim predviđanjima smatra se da će biodizel ostati njegova dominantna primjena. Razlog za to temelji se na tome da je prelazak na biodizel potkrijepljen politikom te predstavlja povoljnu ekonomsku opciju. Proizvodnja biodizela iz otpadnih ulja je relativno zrela i financijski pristupačna tehnologija u usporedbi s proizvodnjom biodizela iz ranije spomenutih drugih sirovina.



Politika u Europskoj uniji usmjerena je prema povećanju udjela obnovljive energije unutar prometnog sektora kroz biogorivo nastalo kao produkt iz otpadnog jestivog ulja. Prema podacima, njegov udio kao sirovine za proizvodnji biodizela unutar Europske unije te Ujedinjenog Kraljevstva je 2018. godine iznosio 19 % (2,85 Mt) .

U tablici je prikazan pregled potrošnje energije u prometu, udio dizela i biodizela, kao i udio otpadnog jestivog ulja.

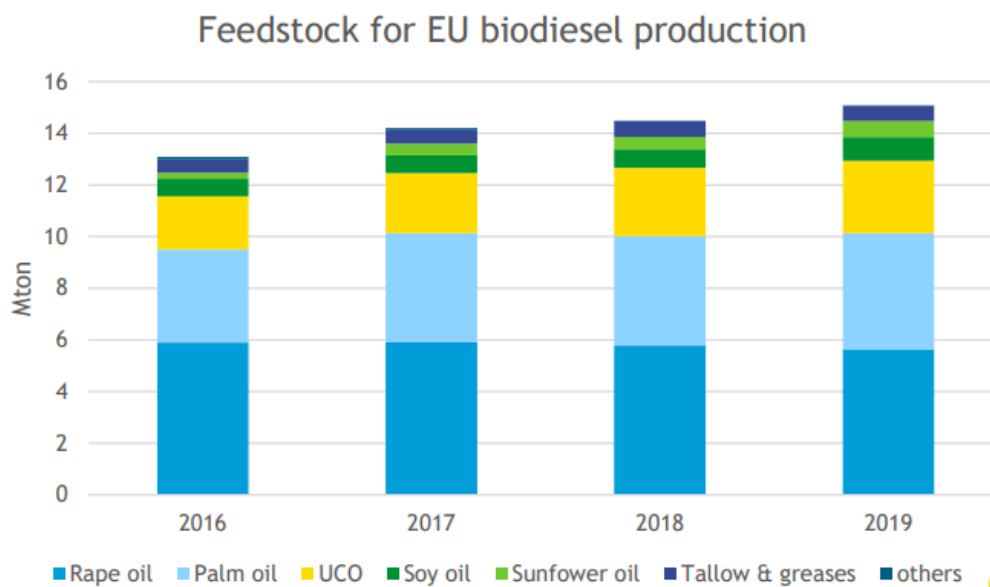
	Energy consumption transport*	Share of diesel in total energy consumption	Share of biodiesel in total energy consumption	UCOME as part of biodiesel	UCOME as part of energy consumption in transport
Unit	TJ	% of TJ	% of TJ	% of TJ	% of TJ
Year	2018	2018	2018	2018	2018
Data source	Eurostat	Shares	Shares	Shares	Shares
<b>EU27+UK</b>	<b>13,757,434</b>	<b>64</b>	<b>3.9</b>	<b>19</b>	<b>0.8</b>
Belgium	372,790	74	4.1	3	0.1
Bulgaria	141,187	61	4.0	31	1.3
Czech	278,836	66	3.7	0	0
Denmark	185,162	62	3.9	0	0
Germany	2,332,837	60	3.4	41	1.4
Estonia	34,826	64	1.5	0	0
Ireland	171,878	75	3.1	83	2.6
Greece	247,183	43	2.7	9	0.3
Spain	1,362,009	69	4.6	0	0
France	1,897,061	70	5.6	5	0.3
Croatia	89,616	69	1.2	1	0
Italy	1,489,642	61	3.4	11	0.4
Cyprus	28,406	45	1.3	100	1.3
Latvia	46,420	75	2.6	0	0
Lithuania	87,148	78	3.4	0	0
Luxembourg	87,986	79	5.4	1	0.1
Hungary	201,393	62	3.0	65	1.9
Malta	9,662	61	4.2	94	3.9
Netherlands	453,506	54	3.1	83	2.5
Austria	367,618	71	4.1	1	0
Poland	938,458	64	3.3	0	0
Portugal	245,319	71	4.3	64	2.8
Romania	263,925	71	3.2	0	0
Slovenia	82,271	73	3.4	30	1.0
Slovakia	114,888	67	4.8	0	0
Finland	177,582	57	6.6	0	0
Sweden	299,197	44	12.4	1	0.2
United Kingdom	1,750,630	64	2.2	80	1.7

Slika 8.1 Potrošnja energije i biodizela u EU i UK [13]

Potrošnja energije prikaza na slici 8.1 obuhvaća cestovni promet (automobili, autobusi, kamioni i slično), željeznički promet (vlakovi, metro, tramvaji), domaći zračni promet, domaću plovidbu i cjevovodni transport.

Uspoređujući podatke, vidljivo je da biodizel čini prosjek od 3,9 % u većini država članica Europske unije i Ujedinjenog Kraljevstva, osim Švedske čiji je udio puno veći te Estonije, Hrvatske i Cipra s najnižim udjelom.

Otpadno jestivo ulje je treće najčešće korištena sirovina u Europskoj uniji i Ujedinjenom Kraljevstvu za proizvodnju biodizela s 18,5 % ukupne sirovine, nakon ulja repice (37 %) te palminog ulja (30 %).



Slika 8.2 Omjer iskorištenih sirovina za proizvodnju biodizela [13]

Slika 8.2 prikazuje graf povećanja proizvodnje biodizela upotrebnom otpadnog jestivog ulja te palminog kao sirovina.

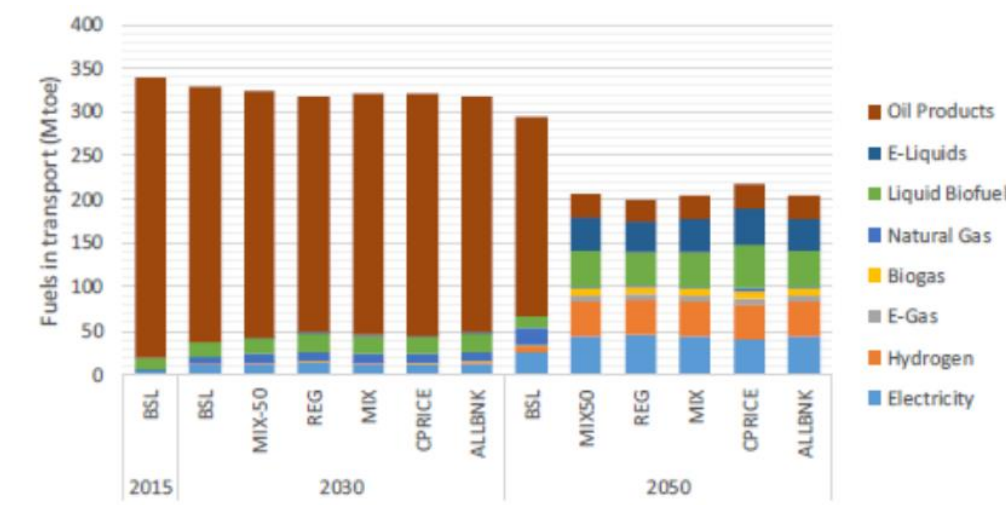
Proizvodnja biodizela dominira u pet država članica, a to su: Njemačka, Francuska, Italija, Španjolska i Nizozemska. Prema podacima za 2023.godinu, njemačka inustrija biodizela proizvela je otprilike 3,7 milijuna tona, od čega je 52,3 % dobiveno od ulja repice. Za usporedbu, bilo je potrebno oko 1,92 milijuna tona ulja repice koje je dobiveno iz otprilike 4,8 milijuna tona repice [14].

Uz biodizel proizveden u Europskoj uniji, uvozi se oko 3 milijuna tona rafiniranog biodizela. Još od 2014. godine, neto uvoz otpadnog jestivog ulja je znatno porastao zahvaljujući Kini, Indoneziji, Maleziji, Rusiji te Saudijskoj Arabiji kao glavnim izvoznocima za EU.

Direktivom o obnovljivoj energiji postavlja se cilj daljnjeg povećanja udjela obnovljive energije u prometu do 2030. godine. Također, dio cilja je i poticanje naprednih biogoriva (otpadnog jestivog ulja) s istovremenim ograničavanjem rasta biogoriva iz hrane.

U praksi direktiva o obnovljivoj energiji osigurava da dobavljači goriva prema nacionalnim politikama država članica EU su obavezni opskrbljivati dio obnovljivih goriva, odnosno biodizela unutar goriva koja plasiraju na tržište. Biogoriva moraju zadovoljiti kriterije održivosti zbog postizanja navedenih ciljeva.

Također, radni program komisije Europske unije iz 2020. godine, pod nazivom „FuelEU“, pokrenuo je konkretnu inicijativu s ciljem bržeg postizanja klimatski neutralnog pomorskog prometa s niskim emisijama. Očekivani rezultat ovog programa je povećanje upotrebe održivih alternativnih goriva u europskom pomorskom prometu te lukama uz istovremeno rješavanje tržišnih prepreka te neizvjesnosti o tržišnoj spremnosti tehničke izvedivosti. Inicijativa bi trebala uskladiti pomorski sektor s ambicijama EU da postane klimatski neutralan do 2050. godine.



Slika 8.3 Dijagramski prikaz korištenja goriva u transportu (uključujući zrakoplovni i pomorski promet) [13]

Slika 8.3 prikazuje planirani okvirni omjer korištenja različitih goriva u budućnosti, uzimajući u obzir da zrakoplovstvo trenutno nema drugih opcija za dekarbonizaciju u usporedbi s pomorskim i cestovnim prometom, zbog visoke razine kvalitete i sigurnosti koju zahtijeva.

### 8.1 Odlaganje i otkup otpadnih jestivih ulja u Hrvatskoj

U današnje vrijeme postoji nekoliko različitih vrsta ulja koja se svakodnevno koriste za pripremu hrane, uzimajući u obzir domaćinstva i ugostiteljske objekte. Kao rezultat, svakodnevno se proizvode velike količine otpadnog jestivog ulja koje zahtijeva primjereno

odlaganje. Otpadno jestivo ulje može prouzročiti niz problem ukoliko se ispušta u kanalizacijski sustav gdje taloženjem masnih naslaga na stijenkama cijevi može dovesti do začepljenja. Uz to, neispravno odlaganje koje dospije u prirodu može negativno utjecati na vodene ekosustave.

Prema neformalnim podacima u Hrvatskoj se generira više od 9 milijuna litara jestivog ulja tijekom jedne godine, što bi bilo oko dvije litre po stanovniku. Otpadno jestivo ulje može prouzročiti niz problem ukoliko se ispušta u kanalizacijski sustav gdje taloženjem masnih naslaga na stijenkama cijevi može dovesti do začepljenja. Uz to, neispravno odlaganje koje dospije u prirodu može negativno utjecati na vodene ekosustave i tlo učiniti nepovoljnim za rast biljaka.

Otpadno jestivo ulje moguće je pravilno zbrinuti na previđenim lokacijama za recikliranje ili predajom tvrtkama ovlaštenim za reciklažu. Na ovaj način moguće je ulje iskoristiti na održiv način te izbjeći ekološki rizik. Primjerice u Hrvatskoj postoji više lokacija reciklažnih dvorišta u okolicama većih gradova kao što su Zagreb, Split, Rijeka i Osijek. Osim navedenih lokacija, moguće je zbrinuti otpadno ulje i na određenim benzinskim crpkama.

Komunalna tvrtka u Rijeci je 2021. godine uvela pilot-projekt u sklopu kojeg su na 10 lokacija postavljeni spremnici za prikupljanje otpadnog jestivog ulja iz kućanstva.

Slika 8.2 prikazuje primjer postavljenog spremnika za prikupljanje otpadnog jestivog ulja koji je dostupan građanima. Lokacija spremnika prikazanog na slici je u okolici Poreča.



Slika 8.4 Spremnik za prikupljanje otpadnog jestivog ulja

Primjer je i nacionalna nafta kompanija INA koja je u Hrvatskoj 2017. godine pokrenula projekt prikupljanja otpadnog jestivog ulja na svojim maloprodajnim mjestima. Prema neformalnim podacima ova naftna kompanija je u prve tri godine provođenja ovog projekta prikupila više od 16.000 kg otpadnog jestivog ulja koje je nakon zbrinjavanja reciklirano i ponovno iskorišteno.

## 9 ZAKLJUČAK

Provedeno je eksperimentalno mjerenje ogrjevnne moći otpadnog jestivog ulja kako bi se na temelju dobivenih rezultata mogla napraviti usporedba i prikazati odstupanja u vrijednostima. Za navedena mjerenja korišteno je otpadno suncokretovo ulje te otpadna biljna ulja iz restorana. U tablici 9.1 prikazana je ogrjevna vrijednost suncokretovog ulja prije korištenja te ogrjevna vrijednost iskorištenog ulja. Može se vidjeti da je ogrjevna vrijednost ulja nakon korištenja nešto manja.

Također, na dnu tablice kao usporedba navedena je i gornja ogrjevna vrijednost dizel goriva koje se koristi za pogon automobila. Razlika između tih vrijednosti je prikazana kako bi se nadopunila priča o korištenju otpadnog jestivog ulja za proizvodnju biodizela. Naravno, treba uzeti u obzir da nakon procesa filtriranja i recikliranja otpadnog jestivog ulja će doći do određenih promjena te ogrjevna vrijednost biodizela može biti nešto drugačija. U tablici 9.1 prikazana je usporedba vrijednosti nekorištenog suncokretovog ulja s mjerenjima otpadnog jestivog ulja. Prva vrijednost u tablici prikazuje rezultate mjerenja iz literature. Iz tablice 9.1 vidljive su razlike u mjerenjima koje mogu biti uzrokovane nizom čimbenika kao što su: koliko puta je uzorak bio termički obrađen, kako i koliko dugo je uzorak bio pohranjen nakon termičke obrade, miješanje s drugim otpadnim uljima, uvjeti u kojima se provode mjerenja i slično.

*Tablica 9.1 Usporedba ogrjevnih moći*

	Gornja ogrjevna vrijednost $H_g$ [MJ/kg]
Suncokretovo ulje	39,179
1. mjerenje (korišteno suncokretovo ulje)	38,726
2. mjerenje (korišteno suncokretovo ulje)	38,293
3. mjerenje (korišteno ulje iz domaćinstva)	38,741
4. mjerenje (korišteno ulje iz restorana)	38,340

Kroz rad je postavljeno nekoliko teza vezanih za otpadno jestivo ulje te su iste potvrđene kroz podatke i objašnjenja. Neke od njih su:

- Otpadno jestivo ulje ima mogućnost biorazgradnje te u manjim količinama ne predstavlja opasnost za okoliš ukoliko završi tamo
- Kao otpad može prouzročiti niz problema u odvodima
- Otpadno jestivo ulje predstavlja vrijednu sirovinu

S ekonomsko-političkog stajališta, povećanje upotrebe biodizela može smanjiti ovisnost zemalja o uvozu nafte što uključuje i određenu sigurnost u slučaju nestabilnosti cijena na tržištu i izbjegavanje mogućih problema transporta.

## 10 LITERATURA

- [1] „1108 Oxygen Combustion Vessel – Operating Instruction Manual“, Parr Instrument Company, No. 204M
- [2] Bonefačić, I.; Wolf, I.: Predavanje „Mjerenje ogrjevne moći biomase“ iz kolegija „Toplinska mjerenja“
- [3] <https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel-production>
- [4] [https://www.hielscher.com/biodiesel\\_transesterification\\_01.htm](https://www.hielscher.com/biodiesel_transesterification_01.htm)
- [5] [Everything You Ever Wanted to Know About Biodiesel | LinkedIn](#)
- [6] <https://www.mcdonalds.com/ae/en-ae/biodiesel-initiative.html>
- [7] <https://mcdonaldsblog.in/2019/06/westlife-becomes-the-first-food-company-to-use-100-biodiesel/>
- [8] [https://fssai.gov.in/upload/media/FSSAI\\_News\\_McDonald\\_Express\\_25\\_07\\_2018.pdf](https://fssai.gov.in/upload/media/FSSAI_News_McDonald_Express_25_07_2018.pdf)
- [9] <https://www.powerprogress.com/news/man-high-speed-marine-engine-100-biofuel-ready/8028535.article>
- [10] <https://www.man-es.com/company/press-releases/press-details/2023/04/25/man-175d-biofuel-ready>
- [11] <https://www.man-es.com/marine/strategic-expertise/future-fuels/biofuel>
- [12] <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-biodiesel-cars-work>
- [13] [https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/CE\\_Delft\\_200247\\_UCO\\_as\\_biofuel\\_feedstock\\_in\\_EU\\_FIN\\_AL-v5.pdf](https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/CE_Delft_200247_UCO_as_biofuel_feedstock_in_EU_FIN_AL-v5.pdf)
- [14] <https://bioenergytimes.com/germany-produced-3-7-million-tonnes-of-biodiesel-in-2023/>



## 11 POPIS SLIKA

Slika 3.1 Shematski prikaz elemenata na ulazu i izlazu iz ložišta .....	11
Slika 4.1 Prikaz kalorimetrijske bombe .....	13
Slika 4.2 Presjek unutrašnjosti kalorimetrijske bombe .....	15
Slika 5.1 Priprema za laboratorijsko mjerenje .....	16
Slika 5.2 Posuda za kalorimetrijsku bombu .....	17
Slika 5.3 Mjerenje mase uzorka goriva .....	17
Slika 5.4 Poklopac kalorimetrijske bombe s pripremljenim uzorkom goriva.....	18
Slika 5.5 Definiranje tlaka kalorimetrijske bombe pomoću boce s kisikom.....	19
Slika 5.6 Posuda s vodom i kalorimetrijskom bombom.....	20
Slika 5.7 Krivulja porasta temperature prvog mjerenja .....	24
Slika 5.8 Krivulja porasta temperature drugog mjerenja .....	27
Slika 5.9 krivulja porasta temperature trećg mjerenja.....	29
Slika 5.10 Krivulja porasta temperature četvrtog mjerenja.....	31
Slika 6.1 Shematski prikaz proizvodnje biodizela .....	32
Slika 6.2 Dijagram toka ultrazvučnog procesa proizvodnje biodizela.....	33
Slika 7.1 McDonald's-ov program korištenja biogoriva .....	34
Slika 7.2 Kružni proces korištenja otpadnog jestivog ulja.....	35
Slika 7.3 Motor MAN 175D s pogonom na biogoriva.....	37
Slika 7.4 Komponente vozila s biodizelom.....	38
Slika 8.1 Potrošnja energije i biodizela u EU i UK Izvor: Van Grinsven, A., van den Toorn, E., van der Veen, R., Kampman, B., & Oil, C. (2020). Used Cooking Oil (UCO).....	40
Slika 8.2 Omjer iskorištenih sirovina za proizvodnju biodizela .....	41
Slika 8.3 Dijagramski prikaz korištenja goriva u transportu (uključujući zrakoplovni i pomorski promet) .....	42
Slika 8.4 Spremnik za prikupljanje otpadnog jestivog ulja.....	43

## 12 POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Podaci o masi prije mjerenja .....	18
Tablica 5.2 Rezultati mjerenja .....	21
Tablica 5.3 Rezultati prvog mjerenja .....	23
Tablica 5.4 Rezultati drugog mjerenja .....	26
Tablica 5.5 Rezultati trećeg mjerenja .....	28
Tablica 5.6 Rezultati četvrtog mjerenja .....	30
Tablica 9.1 Usporedba ogrjevnih moći .....	45

## 13 SAŽETAK

U sklopu diplomskog rada „Mjerenje ogrjevnosti vrijednosti otpadnog jestivog ulja“ prikazan je i objašnjen postupak kalorimetriranja te dobiveni rezultati eksperimentalnog određivanja ogrjevnosti. Prije mjerenja obavljen je postupak kalorimetriranja instrumenta te se dobivena vrijednost konstante koristila dalje u ostalim mjerenjima. Postupak mjerenja ogrjevnosti ponovljen je nekoliko puta na različitim uzorcima korištenog jestivog ulja. Sukladno dobivenim rezultatima mjerenja, kroz rad je objašnjena mogućnost korištenja istog za proizvodnju biodizela kao alternativno rješenje fosilnih goriva. Prateći postojeće primjere prikazan je zaokruženi ciklus u kojem je moguće da se unutar istog lanca ulje koristi za pripremu hrane, a potom nakon procesa recikliranja ponovno upotrijebi kao biodizel za transport.

Ključne riječi: korišteno jestivo ulje, otpadno ulje, kalorimetar, ogrjevna moć, gornja ogrjevna vrijednost, gorivo, biodizel, alternativno gorivo, fosilna goriva, obnovljivi izvori energije, biljna ulja.

## 14 SUMMARY

As part of the thesis "Measurement of the Heating Value of Waste Cooking Oil," the process of calorimetry and the results obtained from the experimental determination of the heating value are presented and explained. Before the measurements, a calorimeter calibration was performed, and the obtained constant value was used in further measurements. The procedure for measuring heating value was repeated several times on different samples of used cooking oil. Based on the obtained measurement results, the possibility of using the same for biodiesel production as an alternative solution to fossil fuels is explained in the thesis. Following existing examples, a closed-loop cycle is presented in which oil can be used for food preparation and then, after the recycling process, reused as biodiesel for transportation.

**Keywords:** used cooking oil, waste oil, calorimeter, heating value, fuel, biodiesel, alternative fuel, fossil fuels, renewable energy sources, vegetable oils.