

KO ZAKAŠLJA SVEČKA

Raziskovalna naloga s področja tehnike ali tehnologije (strojništva)

Avtorji: Enej Falatov, Lovro Hudomalj in Tomi Krivec

Mentor: Damjan Jan Pavlica

Somentorja: Jošt Herman in Monika Manfreda

Tolmin, 2025

ZAHVALA

Najprej se zahvaljujemo mentorju dr. Damjanu Janu Pavlici, ki nas je spodbudil k udeležbi na tekmovanju in pisanju te naloge ter nam ves čas pomagal tako pri strokovnih vprašanjih s področja kemije in fizike kot tudi pri pisanju naloge.

Raziskovalno nalogo smo opravili v podjetju Hidria d. o. o., zato se zahvaljujemo podjetju, da nam je omogočilo izvedbo raziskovalne naloge.

Zahvaljujemo se tudi somentorjema, Joštu Hermanu in Moniki Manfredi, zaposlenima v Hidrii, za strokovno pomoč s področja tehnike in uvajanje v delo z laboratorijskimi napravami ter ostalim zaposlenim, ki so na kakršenkoli način pomagali pri izvedbi naloge.

Zahvaljujemo se tudi dr. Milanu Ambrožiču, ki nam je pomagal na teoretičnem področju in pri pisanju naloge, ter Miri Bandelj in Milici Rutar za jezikovni pregled naloge.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Žarilne svečke	2
1.2	Vzroki odpovedi svečke	3
1.3	Spektroskopske tehnike	6
1.4	FTIR-spektroskopija.....	7
1.5	Piroliza in aromatičnost.....	7
2	EKSPERIMENTALNI DEL	9
2.1	Priprava vzorca iz reklamiranih svečk	9
2.2	Priprava vzorcev termičnega razpada olja	11
2.3	Priprava vzorcev termičnega razpada olja z MgO	11
2.4	Priprava vzorcev termičnega razpada olja v svečkah.....	11
2.5	FTIR-analiza.....	13
3	REZULTATI IN RAZPRAVA	15
3.1	Potrditev prisotnosti olja v reklamiranih svečkah	15
3.2	Vizualna analiza termičnega razpada olja	17
3.3	FTIR-analiza razgradnih produktov mazalnega olja	21
3.4	Nastanek prevodnih sajastih spojin	25
3.5	Ukrepi za zmanjšanje reklamacij svečk	26
4	ZAKLJUČEK	27
5	VIRI IN LITERATURA	29
6	PRILOGE	31

KAZALO SLIK

Slika 1: Zgradba samokrmilne žarilne svečke.....	3
Slika 2: Kontrolna lučka za predžarenje.....	3
Slika 3: Kratek stik v svečki zaradi kovinskega delca.....	4
Slika 4: Poškodovan žarilni del grelca svečke.....	4
Slika 5: Prekinjena elektroda.....	4
Slika 6: Mehanske poškodbe ohišja svečke.....	5
Slika 7: Trisulfidna molekula v mazalnem olju.....	9
Slika 8: Praskanje potemnjene MgO iz prerezanega grelca svečke.....	10
Slika 9: Izpraskani MgO smo zbrali v epruveti in ga zalili s petroletrom.....	10
Slika 10: Segrevanje vzorcev olja	11
Slika 11: Slikanje prerezanih svečk z digitalno lupo.....	12
Slika 12: Ekstrakcija mazalnega olja iz izpraskanega magnezitnega prahu.....	12
Slika 13: Pipetiranje z elektronsko pipeto.....	13
Slika 14: FTIR naprava.....	14
Slika 15: Spekter olja Zet-cut.....	15
Slika 16: Primerjava spektra olja Zet-cut in ekstrakta.....	17
Slika 17: Vzorci olja, ki smo jih za eno uro segrelo.....	18
Slika 18: Vzorci olja z magnezitom, ki smo jih segreli.....	18
Slika 19: Notranjost grelnega elementa, kontaminiranega z oljem.....	19
Slika 20: Notranjost grelnega elementa po segrevanju na 150 °C.....	19
Slika 21: Notranjost grelnega elementa po segrevanju na 200 °C.....	20
Slika 22: Notranjost grelnega elementa po segrevanju na 250 °C.....	20
Slika 23: Notranjost grelnega elementa po segrevanju na 300 °C.....	20
Slika 24: FTIR-spekter čistega olja Zet-cut, povečan na območje 1500–500 cm ⁻¹	22
Slika 25: FTIR-spektri vzorcev olja (O1–O5).....	22
Slika 26: FTIR-spektri vzorcev olja z magnezitom (M1–M5).....	23
Slika 27: FTIR-spektri vzorcev olja v svečkah (G1–G5).....	25
Slika 28: Celoten FTIR-spekter vzorcev O1–O5.....	31
Slika 29: Celoten FTIR-spekter vzorcev M1–M5.....	32
Slika 30: Celoten FTIR-spekter vzorcev G1–G5.....	33

KAZALO TABEL

Tabela 1: Pogoji staranja vzorcev pri različnih temperaturah.....	31
--	----

SEZNAM KRATIC IN SIMBOLOV

EM valovanje: elektromagnetno valovanje

ATR-FTIR: (angl. *Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared spectroscopy*),
tehnika oslabiljenega popolnega odboja infrardeče spektroskopije s Fourierovo transformacijo

MgO: magnezit

c : svetlobna hitrost

λ : valovna dolžina

ν : frekvenca

k : valovno število

E_f : energija fotona

h : Planckova konstanta

POVZETEK

V raziskovalni nalogi smo analizirali razloge za prezgodnjo odpoved avtomobilskih žarilnih svečk podjetja Hidria, pri čemer smo se osredotočili na morebitno kontaminacijo grelnega elementa z mazalnim oljem Zet-cut. Uporabili smo ATR-FTIR spektroskopijo za zaznavanje kemijskih spojin v izpraskanem magnezitu iz reklamiranih svečk ter v vzorcih olja, ki smo jih segreli na različne temperature.

Spektri so pokazali značilne vrhove za ogljikovodike, estre in sulfidne aditive, prisotne v osnovnem olju. Pri višjih temperaturah (250–300 °C) so se pojavili tudi aromatski vrhovi, značilni za tvorbo policikličnih aromatskih ogljikovodikov in saj. Ti produkti zmanjšujejo električno upornost izolacijskega materiala in so možen vzrok za kratek stik v grelnem delu svečke.

Raziskava potrjuje, da je FTIR-spektroskopija primerna metoda za odkrivanje kontaminacije svečk z oljem. Rezultati so pomembni za optimizacijo proizvodnega procesa ter zmanjšanje reklamacij v avtomobilski industriji.

Ključne besede: spektroskopija, FTIR, avtomobilska svečka, mazalno olje

ABSTRACT

In this research project, we investigated the premature failure of automotive glow plugs manufactured by Hidria, focusing on potential contamination of the heating element with Zet-cut lubricant oil. We used ATR-FTIR spectroscopy to detect chemical compounds in the extracted magnesium oxide from returned glow plugs and in oil samples heated to different temperatures.

The FTIR spectra revealed characteristic peaks for hydrocarbons, esters, and trisulfide additives found in the base oil. At higher temperatures (250–300 °C), aromatic bands emerged, indicating the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and soot. These products reduce the electrical resistance of the insulation and may cause short circuits in the glow plug.

Our findings confirm that FTIR spectroscopy is a reliable method for detecting oil contamination and its thermal degradation products inside glow plugs. The results are significant for optimizing the manufacturing process and reducing product complaints in the automotive industry.

Keywords: Spectroscopy, FTIR, Automotive glow plug, Lubricant oil

1 UVOD

Cilj vsakega podjetja je optimizacija stroškov, aktivnosti in procesov, saj želi doseči boljše rezultate in povečati dobiček. Reklamacije pa privedejo do dodatnih stroškov in tudi do izgube zaupanja strank.

Podjetje Hidria d. o. o., vodilni proizvajalec žarilnih svečk, se je v zadnjem obdobju soočilo z reklamacijami, ki jih obstoječi sistem kontrole kakovosti ni znal pojasniti. Eden izmed možnih vzrokov je kontaminacija grelnega dela svečke z mazalnim oljem.

Žarilne svečke delujejo v zelo zahtevnih pogojih, v katerih lahko že najmanjše sledi neželenih snovi vplivajo na njihovo zanesljivost in delovanje. Med sestavljanjem svečk se uporablja mazalno olje, ki pa je v končnem izdelku nezaželeno. Domnevamo, da olje zaradi kemijskih sprememb med delovanjem motorja postane električno prevodno. Tako spremenjeno olje lahko povzroči kratek stik v grelnem delu svečke, kar vodi do njene okvare.

Cilj našega raziskovalnega dela je bil z uporabo FTIR spektroskopije preveriti, ali se v reklamiranih svečkah nahaja mazalno olje, in raziskati, zakaj sicer električno neprevodno olje po več letih delovanja svečke postane prevodno. Dodatni cilj raziskave je bil razviti zanesljivo in ponovljivo metodo, s katero bi bilo v prihodnje mogoče potrditi ali ovreči prisotnost mazalnega olja v notranjosti grelnega dela svečke.

Hipoteze:

- V notranjosti reklamiranih žarilnih svečk je prisotno mazalno olje, ki je ostanek iz faze sestavljanja in ga je mogoče zaznati s pomočjo FTIR spektroskopije.
- Pri segrevanju olja nastane več razgradnih produktov, ki jih je mogoče zaznati s tehniko FTIR.
- Med razgradnimi produkti nastajajo tudi prevodne spojine, ki lahko povzročijo kratek stik v svečki.

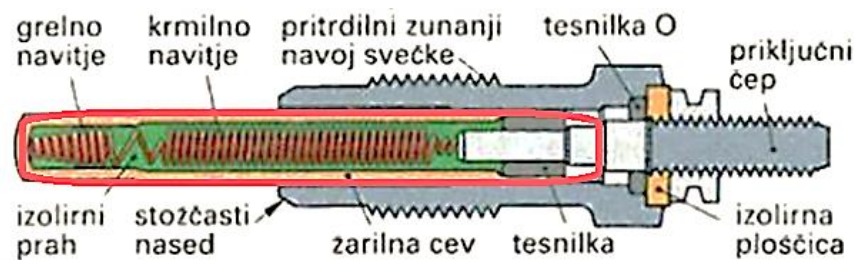
1.1 Žarilne svečke

Hidria sodi med vodilne globalne korporacije na področju avtomobilskih in industrijskih tehnologij. Sedež podjetja je v Spodnji Idriji, podružnice so v Kopru, Poljubinjju, Kranju in na Jesenicah. Izdelujejo širok nabor izdelkov. Raziskovalno nalogo smo opravili v poslovni enoti v Poljubinjju (Hidria Advancetec). Njihov glavni proizvod so ogrevalne svečke, ki so del večine osebnih vozil z dizelskimi motorji.¹

Ena izmed najpomembnejših razlik delovanja dizelskega motorja v primerjavi z delovanjem bencinskega motorja je, da dizelski motorji nimajo vžigalnih svečk, ki pri bencinskih motorjih poskrbijo za vžig goriva v vžigalni komori.² To je mogoče zaradi lastnosti dizelskega goriva, ki je manj nagnjeno k samovžigu kot bencinsko, zaradi česar imajo lahko dizelski motorji večja kompresijska razmerja, tj. koliko se mešanica v zgorevalni komori stisne.³

Dizelski motorji imajo drugo vrsto svečk, in sicer t. i. žarilne, ogrevalne oz. čepne svečke. Te »olajšajo hladen zagon motorja, omogočajo miren in gladek spodnji tek motorja in znižajo emisijo škodljivih snovi« (Golja, 2013, str. 2)². Nameščene so v glavi motorja, tako da je konica grelnega elementa nameščena v zgorevalno komoro vsakega valja.⁴ Žarilne svečke segrejejo mešanico zraka in goriva, saj je pri nižjih zunanjih temperaturah nižja tudi temperatura sten zgorevalne komore. Brez njih bi se namreč lahko zgodilo, da mešanica v zgorevalni komori pri stiskanju ne bi dosegla dovolj visoke temperature, ki omogoča samovžig dizelskega goriva.²

Poznamo dve vrsti žarilnih svečk, in sicer samokrmilne ter elektronsko krmiljene žarilne svečke. Samokrmilne svečke imajo krmilno in grelno žično navitje, ki imata različen temperaturni uporovni koeficient in sta iz žice Kanthal. Okoli obeh grelnih navitij je izolator magnezit (MgO) v prahu, ki je dober električni izolator in zdrži visoke temperature (Slika 1). Del svečke, ki je sestavljen iz navitij in izolirnega prahu, imenujemo grelec svečke. Pri delovanju steče tok zaporedno skozi obe navitji. Ko se segreje grelno navitje, se segreje tudi krmilno navitje, s tem se mu poveča električna upornost in zato steče skozenj manjši tok. Tako se svečka »samokrmili« in prepreči pregrevanje. Elektronsko krmiljene svečke se krmilijo elektronsko, zato imajo lahko krajše krmilno navitje in s tem krajšo zakasnitev delovanja pri nizkih temperaturah.² Svečke, ki jih ta naloga obravnava, so elektronsko krmiljene.



Slika 1: Zgradba samokrmilne žarilne svečke.² Del svečke, obkrožen z rdečo, je grelec svečke, kjer je pri raziskovanih reklamiranih svečkah potekel kratak stik med kovinskim grelnim navitjem in ohišjem. Z zeleno je obarvano področje električnega izolatorja MgO (magnezita), ki bi po kontaminaciji z mazalnim oljem lahko postal prevoden.

Obe vrsti svečk krmili zagonska naprava. Ta pri vklopu vžiga dovede napetost do žarilnih svečk, če zazna, da je temperatura hladilne tekočine dovolj nizka (< ca. 60 °C; predžarjenje). Takrat se vklopi tudi kontrolna lučka za voznika, ki ga opominja, da je treba počakati, da se zgorevalna komora ogreje na primerno temperaturo (Slika 2). Ko je dosežena primerna temperatura zgorevalne komore, lučka ugasne, predžarjenje pa se nadaljuje še nekaj sekund, da lahko voznik zažene motor (žarenje ob zagonu). Če motor po zagonu vztraja v prostem teku, delujejo žarilne svečke, dokler ni dosežena primerna delovna temperatura motorja, tj. ko je dosežena temperatura hladilne tekočine okoli 60 °C (naknadno žarjenje).²

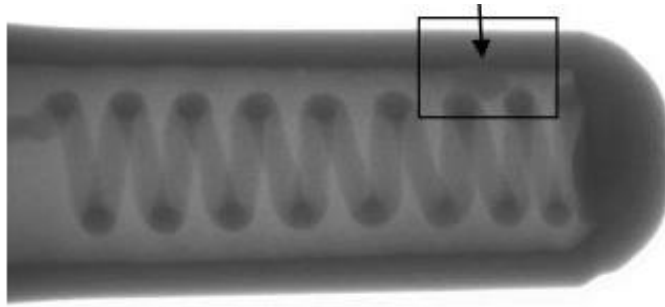


Slika 2: Kontrolna lučka za predžarenje.¹³

1.2 Vzroki odpovedi svečke

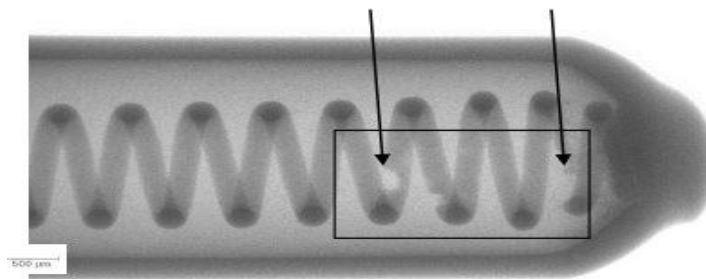
Kakovost svečke je odvisna od uporabljenih materialov in natančnosti izdelave. Napake se pojavljajo zaradi nečistoč, slabe obdelave ali težav pri sestavljanju²:

- Kratki stik, ki nastane zaradi kovinskih delcev (Slika 3) ali drugih prevodnih nečistot v magnezitu.



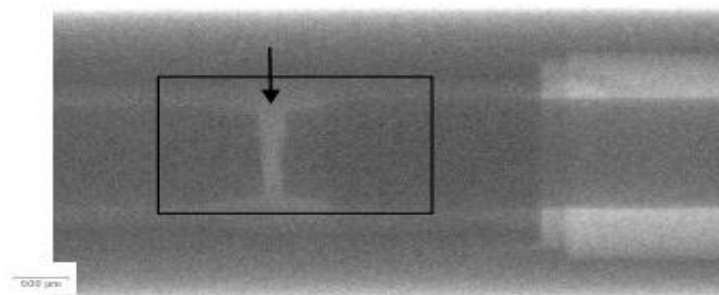
Slika 3: Kratak stik v svečki zaradi kovinskega delca.²

- Nedelovanje grelca zaradi prekinjenega žarilnega kovinskega navitja (Slika 4).



Slika 4: Poškodovan žarilni del grelca svečke.²

- Prekinjen krmilni del svečke (Slika 5).



Slika 5: Prekinjena elektroda.²

- Luščenje zaščitnega galvanskega nanosa ohišja, kar skrajša življenjsko dobo svečke zaradi korozije.

- Mehanske poškodbe zunanosti svečke, ki povzročajo težave pri montaži in tesnjenju motorja (Slika 6).



Slika 6: Mehanske poškodbe ohišja svečke.²

Da bi preprečili reklamacije, v Hidrii sistematično pregledujejo in izločajo okvarjene svečke z naslednjimi testi:²

- **Vizualni pregled:** s kamero preverijo, ali ima svečka vidne poškodbe.
- **Merjenje upornosti:** preverijo, ali so vsi kovinski deli spojeni (ob prekinitvah izmerijo neskončno upornost).
- **Test žarjenja:** preverijo, ali svečke dosežejo pravo temperaturo.
- **Rentgenski pregled** pokaže skrite napake v materialih.
- **Trajnostni testi:** svečke preizkusijo v pogojih, ki simulirajo delovanje v motorju.

Če veliko svečk v seriji ne prestane testov, analizirajo napako in izboljšajo proizvodni proces, da se podobne težave ne ponovijo.²

1.3 Spektroskopske tehnike

S spektroskopsko analizo ugotavljamo sestavo snovi s pomočjo različnih valovnih dolžin elektromagnetnega (EM) valovanja. Vsak element in vsaka kemijska vez namreč absorbira in emitira le EM-valovanje z določeno valovno dolžino. Pri spektroskopskih analizah pošljemo v snov EM-valovanje različnih valovnih dolžin in ugotavljamo, katere valovne dolžine se absorbirajo ali emitirajo.⁵

Elektromagnetna valovanja imajo lahko različne valovne dolžine. Te segajo od 1 nm do 100 km in več.⁴ Ljudje (kot tudi živali) vidimo le EM-valovanje določenih valovnih dolžin. Pri ljudeh so te od okoli 380 do 750 nm. Z valovno dolžino je obratno sorazmerna frekvenca valovanja. Velja enačba $c = \lambda \cdot \nu$, pri kateri je c svetlobna hitrost, okrog $3 \cdot 10^8$ m/s, λ je valovna dolžina in ν frekvenca. V zvezi z valovno dolžino λ navadno vpeljemo tudi ustrezno valovno število k po definiciji: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Zato sta valovno število in frekvenca valovanja premo sorazmerna. S frekvenco valovanja je sorazmerna energija valovanja. Energija enega fotona, to je svetlobnega kvanta, je enaka $E_f = h \cdot \nu$, kjer je h Planckova konstanta s približno vrednostjo $6,6 \cdot 10^{-34}$ Js. Zadnja enačba je pomembna, ker povezuje frekvenco fotona z energijo kemijskih vezi.⁶

Pri spektroskopiji so najpomembnejše valovne dolžine med 10^{-10} m do 10^{-6} m, kar predstavljajo X-žarki (rentgenski žarki), UV- (ultravijolična) in vidna svetloba, saj je to področje povezano s prehodi notranjih in zunanjih elektronov ter elektronov v molekulskih orbitalah.⁵

Elektroni se v atomih in molekulah nahajajo na določenih energijskih nivojih oz. orbitalah. Elektronom lahko dovedemo energijo v obliki EM-valovanja. Če je to valovanje prave valovne dolžine in posledično vsebuje natanko pravo količino energije, lahko elektroni preskočijo na višjo orbitalo; rečemo, da pridejo v vzbujeno stanje. To lahko, odvisno od elementa atoma, naredijo tudi večkrat zaporedoma, torej imajo več različno vzbujenih stanj. V tem stanju navadno v kratkem času izsevajo enako količino energije (prav tako v obliki EM-valovanja) in preskočijo nazaj na izhodiščno orbitalo oz. v svoje osnovno stanje ali pa v nižje, ampak še zmerom vzbujeno stanje. Pomembno je, da mora biti EM-valovanje natanko prave valovne dolžine, ki je odvisna od kemijske sestave snovi, da pride do absorpcije oz. izsevanja.⁵

1.4 FTIR-spektroskopija

Pri IR (infrardeči) spektroskopiji gre največkrat za absorpcijo ali emisijo svetlobe zaradi nihanja atomov v kemijskih vezeh in ne za prehajanje elektronov v različna energijska stanja. V grobem lahko rečemo, da nihajo dolžine določenih kemijskih vezi, v nelinearnih molekulah pa se lahko vezi tudi upogibajo. V organskih molekulah so to npr. vezi C–H, C–O, C=O itd. Za takšne raziskave je primerna tudi Ramanska spektroskopija, vendar je precej zahtevnejša in dražja.⁶

FTIR (Infrardeča spektroskopija s Fourierjevo transformacijo, angl. *Fourier transform infrared spectroscopy*) je spektroskopska metoda, pri kateri se meri absorpcijo ali emisijo infrardečega sevanja v snoveh. Dobra stran FTIR spektrometra je hitrost analize, saj hkrati izvaja meritev širokega spektralnega območja IR-svetlobe. To omogoča Fourierjeva transformacija, ki z integralnim računom transformira funkcijsko odvisnost sestavljenega sinusnega nihanja od časa v njegovo funkcijsko odvisnost od frekvence. To pomeni, da Fourierjeva transformacija razstavi sestavljeno nihanje na množico (zvezno ali diskretno) posameznih sinusnih nihanj, pri katerih ima vsako nihanje točno določeno frekvenco. Tako neposredno razberemo, katere frekvence in s kolikšnimi intenzitetami vsebuje IR-spekter. Bistveni del naprave je Michelsonov interferometer, ki deluje na osnovi interference, pojava, značilnega za vsako valovanje.⁷

1.5 Piroliza in aromatičnost

Piroliza je proces kemijskega razpada organskih snovi zaradi dovajanja toplote. Razlika med pirolizo in gorenjem je, da piroliza poteka v pogojih brez ali z zelo malo kisika.⁸ Razpadni produkti navadno vključujejo vodo (H₂O), ogljikov oksid (CO), ogljikov dioksid (CO₂), različne organske molekule in tudi ogljikove ostanke v obliki saj.⁹ Te saje so pogosto bogate z aromatskimi strukturami, ki s kondenzacijo tvorijo grafitne ali delno grafitizirane saje. Prisotnost takšnih saj povzroči znatno zmanjšanje električne upornosti olj.

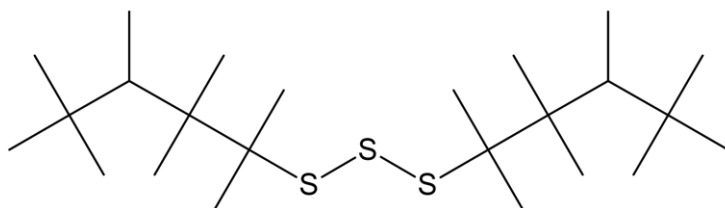
Aromatičnost je kemijska lastnost nekaterih organskih cikličnih spojin, ki daje konjugiranim obročem z nenasičenimi vezmi, neveznimi elektronskimi pari ali praznimi orbitalami večjo stabilnost, kot bi jo pričakovali od same konjugacije. Večja stabilnost je posledica ciklične delo-

kalizacije elektronov in njihove resonance. Delokalizacija elektronov pomeni, da elektroni prosto krožijo okrog krožno razporejenih atomov, med katerimi se izmenjujejo enojne in dvojne vezi.¹⁰

Zaradi svoje stabilne aromatske narave te strukture ne izkazujejo močne IR-aktivnosti, saj njihove vibracije ne povzročajo bistvenih sprememb dipolnega momenta. Posledično jih s FTIR spektroskopijo težko zaznamo. Vendar pa so aromatske in grafitizirane strukture zelo dobro vidne z Ramansko spektroskopijo, ki temelji na spremembi polarizabilnosti molekul. Ramanska analiza omogoča identifikacijo grafitnih jeder ter oceno stopnje urejenosti ogljikovih materialov prek značilnih pasov, kot sta D- in G-pas.¹¹

2 EKSPERIMENTALNI DEL

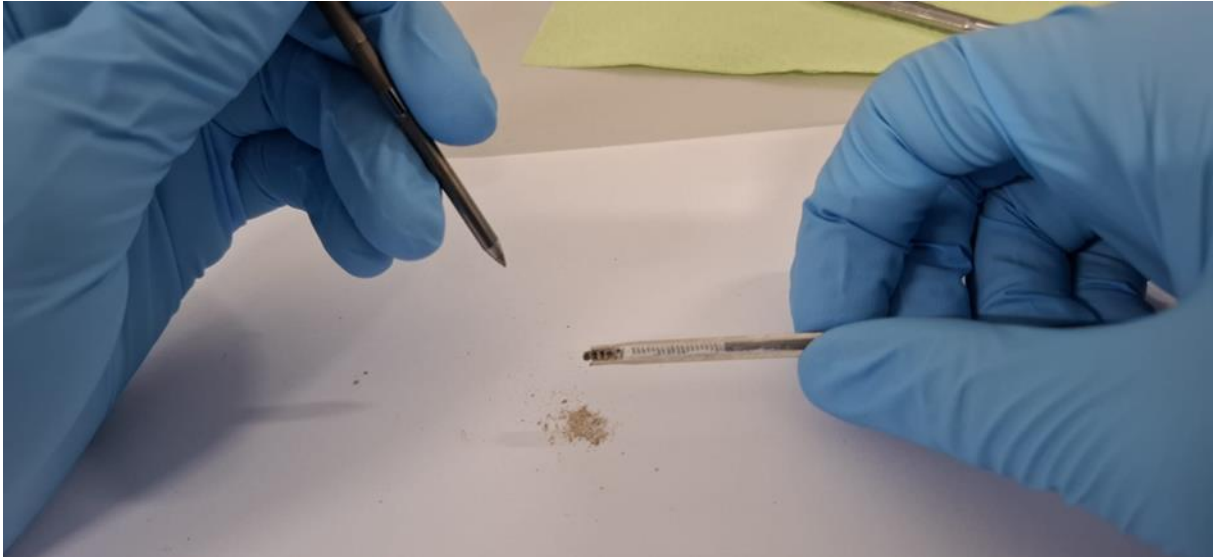
Raziskovali smo mazalno olje Zet-Cut 170/1 proizvajalca Zet-Chemie GmbH, ki se v Hidrii uporablja za lažjo obdelavo kovine pri sestavljanju grelca in ohišja svečk. Mazalno olje je mešanica olja iz ogljikovodikov iz surove nafte s 30–50 ogljikovimi atomi ter različnih aditivov. Med pomembnejšimi so polisulfidi (Slika 7).



Slika 7: Trisulfidna molekula v mazalnem olju, 2-(2,3,3,4,5,5-hexamethylhexan-2-yltrisulfanyl)-2,3,3,4,5,5-hexamethylhexane.

2.1 Priprava vzorca iz reklamiranih svečk

Osem vrnjenih svečk smo vzdolžno prerezali na polovice. V okolici kovinskega grelnega navitja smo opazili temno obarvanje MgO, znak kontaminacije z oljem. Nato smo s kovinsko palčko izpraskali magnezit iz grelcev, in sicer samo tisti del, ki je bil temno obarvan in za katerega smo sumili, da je onesnažen z mazalnim oljem (Slika 8). Da ne bi prišlo do kontaminacije vzorca z maščobami iz rok, smo uporabili zaščitne rokavice. Kovinsko palčko smo razmastili z izopropanolom.



Slika 8: Praskanje potemnjene MgO iz prežanega grelca svečke.

Izpraskan MgO smo zbrali v epruveti in ga zalili s petroletrom, da smo ekstrahirali mazalno olje iz delcev MgO (Slika 9). Ekstrakt smo nato analizirali s FTIR-spektroskopijo.



Slika 9: Izpraskani MgO smo zbrali v epruveti in ga zalili s petroletrom.

2.2 Priprava vzorcev termičnega razpada olja

Mazalno olje Zet-Cut 170/1 je rumene barve (Slika 10), ekstrakt iz reklamiranih svečk pa je bil precej temnejše barve. Med delovanjem svečke so morale poteči kemijske reakcije, ki smo jih poizkusili simulirati s segrevanjem vzorcev olja na 100, 150, 200, 250 in 300 °C. Vzorce olja smo segrevali eno uro (peč *Thermo Electron UT 6060*) v odprtih ampulah, torej so bili med segrevanjem izpostavljeni kisiku. Po segrevanju smo vzorce raztopili v petroletru (vrelišče 45–65 °C) in jih analizirali s FTIR.



Slika 10: Vzorce olja smo postavili v peč in jih eno uro segrevali na 100, 150, 200, 250 in 300 °C.

2.3 Priprava vzorcev termičnega razpada olja z MgO

Ker bi lahko MgO vplival na razpad mazalnega olja, smo pripravili tudi vzorce olja z dodatkom MgO. Odpipetirali smo 1 mL olja in dodali 1 g MgO; odprte ampule smo, enako kot vzorce olja brez MgO, v peči za eno uro segreli na 100, 150, 200, 250 in 300 °C. Po segrevanju smo vzorce razredčili s petroletrrom in jih analizirali s FTIR.

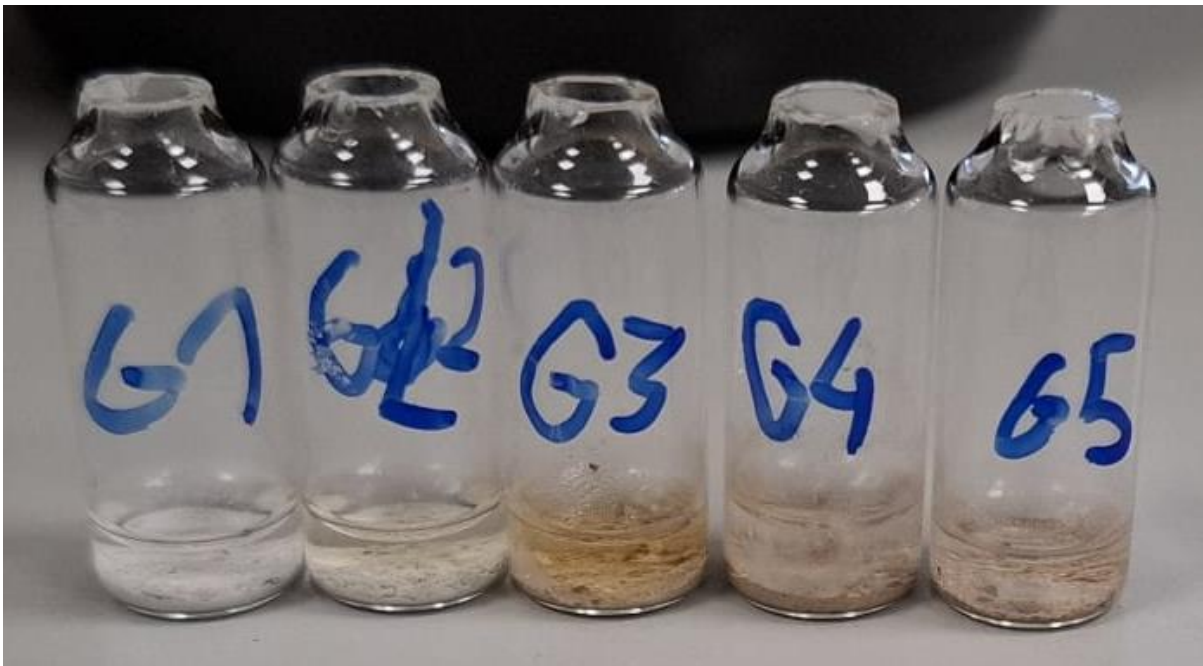
2.4 Priprava vzorcev termičnega razpada olja v svečkah

Ker bi poleg MgO lahko razpad mazalnega olja katalizirali tudi jeklo iz grelnega navitja (jeklo FeCrAl: železo z dodatkom 22 % Cr in 5,3 % Al) ali jeklo ohišja (jeklo 11SMnPb30: železo z dodatki 0,9-1,3 % Mn, 0,27-0,33 % S, 0,20-0,35 % Pb, do 0,11 % P in do 0,14 % C),² smo pripravili tudi vzorce znotraj dejanskih svečk. Grelni del svečk, ki je vstavljen v valj motorja, smo prečno prerezali pri vrhu in ga za en teden namočili v olje. Svečke smo nato postavili v peč pri enakih pogojih kot ostale vzorce, torej eno uro na 100, 150, 200, 250 in 300 °C. Svečke smo nato vzdolžno prerezali na polovici in jih 15-krat povečali ter slikali z digitalno lup (Ash Technologies) (Slika 11).



Slika 11: Slikanje prerezanih svečk z digitalno lupo.

Po slikanju smo ekstrahirali razpadlo mazalno olje na enak način, kot smo to storili pri reklamiranih svečkah (glej podpoglavje 2.1). Potemnjem MgO smo spraskali s kovinsko paličico v epruveto, ga zalili s petroletrom (Slika 12) in ekstrakt analizirali s FTIR.

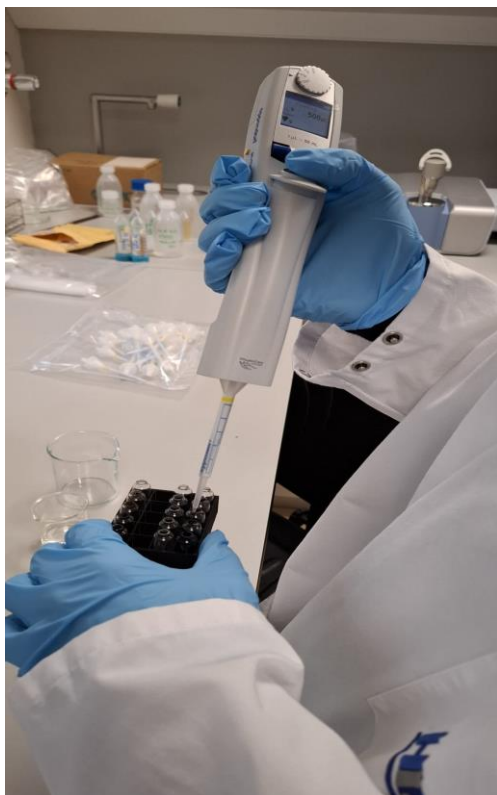


Slika 12: Ekstrakcija mazalnega olja iz izpraskanega magnezitnega prahu grelcev svečk. Od leve proti desni si sledijo vzorci, segreti na 100, 150, 200, 250 in 300 °C.

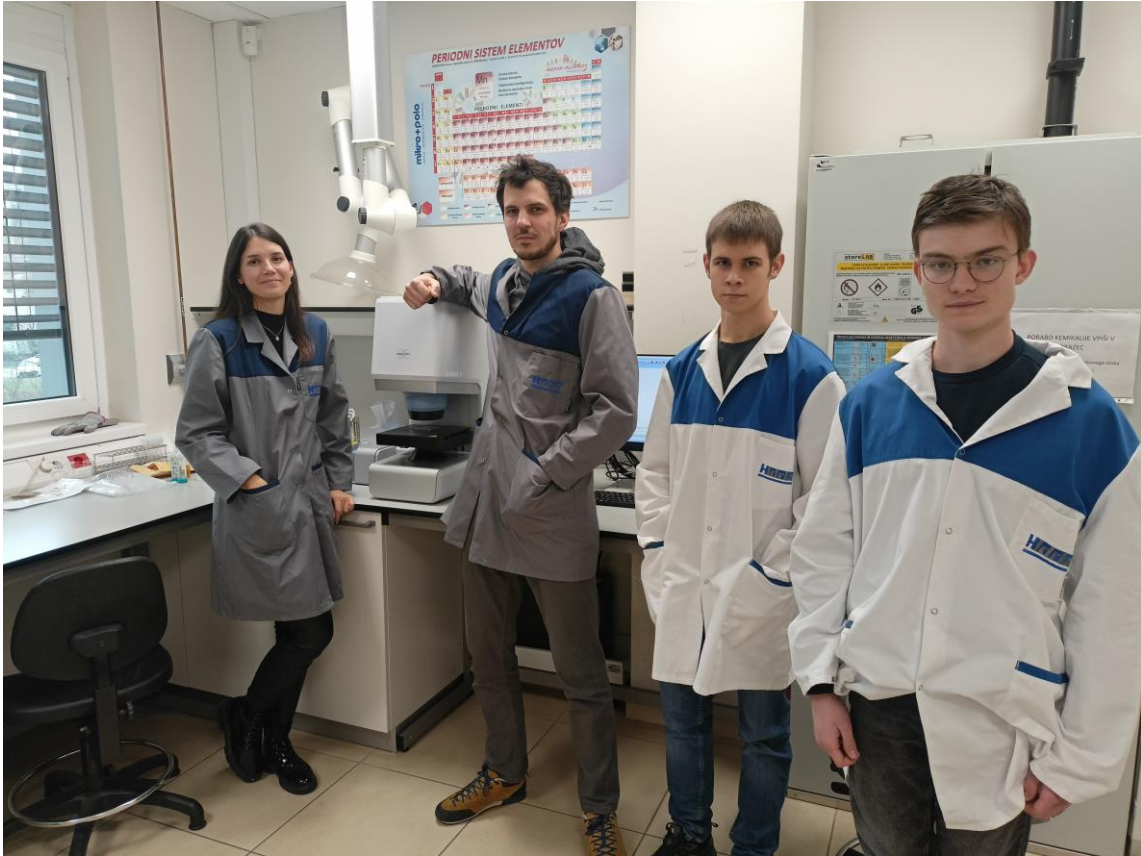
2.5 FTIR-analiza

Za kemijsko karakterizacijo mazalnega olja smo vzorce analizirali z ATR-FTIR spektroskopijo (angl. *Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared spectroscopy*), tehniko oslabljenega popolnega odboja infrardeče spektroskopije s Fourierjevo transformacijo. Informacije o kemijski strukturi smo dobili z merjenjem sprememb, do katerih pride zaradi odboja IR-žarkov od vzorca.

Za pripravo vzorcev za analizo smo vzorcem olja v ampulah najprej dodali po 0,500 ml petroletra (Slika 13). S tem smo razredčili čisto mazalno olje, kar je zmanjšalo prekrivanje absorpcijskih vrhov v FTIR-spektrih in izboljšalo njihovo berljivost. Petroleter smo izbrali, ker ima podobno kemijsko sestavo kot mineralna osnova mazalnega olja, zato olje učinkovito raztaplja.¹⁴ Zaradi teh lastnosti smo petroleter uporabili tudi za ekstrakcijo olja iz trdih delcev izpraskanega magnezita, saj ATR-FTIR spektroskopija deluje le na tekoče vzorce. Dodatna prednost petroletra je njegova visoka hlapnost, ki omogoča koncentriranje ekstraktov, če so v FTIR-spektru premalo intenzivni vrhovi.



Slika 13: Pipetiranje z elektronsko pipeto.



Slika 14: Avtorja raziskovalne naloge s somentorjema: Monika, Jošt, Enej in Lovro ob FTIR-napravi.

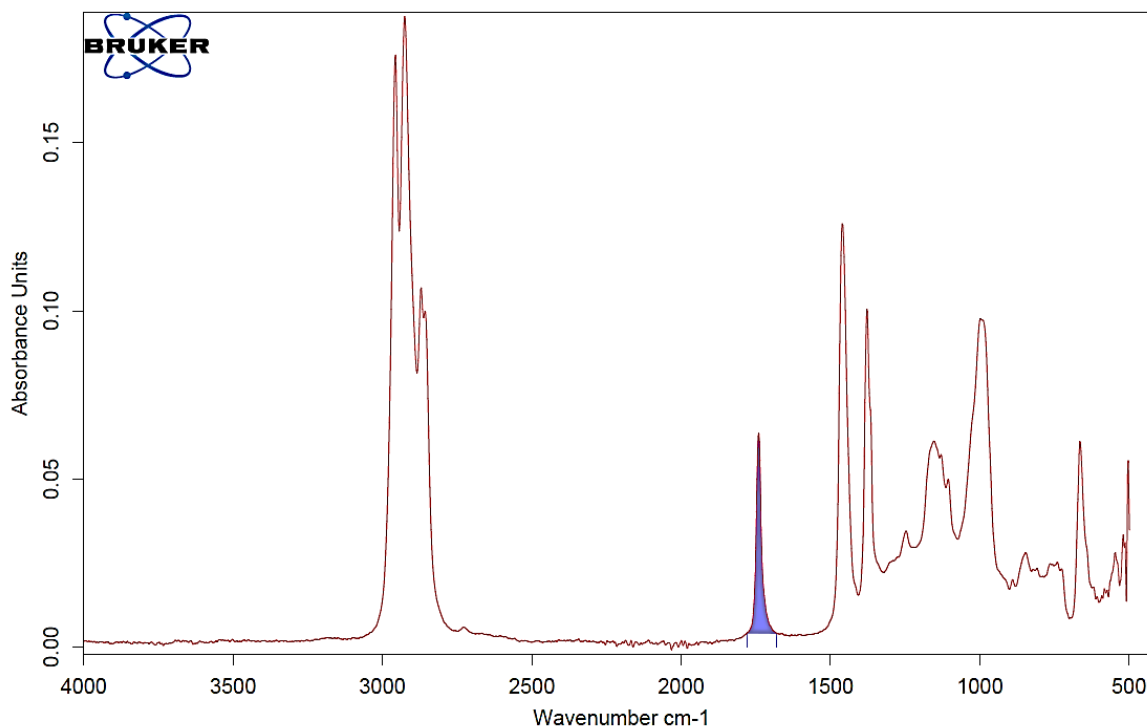
Pred vsako meritvijo smo pipeto najprej sprali s petroletrom, instrument očistili in izmerili ozadje. Nato smo s pomočjo elektronske pipete prenesli 0,150 ml vzorca v FTIR-napravo Lumos II (Bruker Optics). Spektre smo zajeli pri sobni temperaturi (brez dodatnega segrevanja) v območju valovnih števil $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$, s povprečenjem 64 meritev (slika 14).

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

V tem poglavju najprej predstavljamo rezultate analize prisotnosti mazalnega olja v reklamiranih (zavrnenih) grelnih svečkah, pridobljene s pomočjo FTIR-spektroskopije. Sledi prikaz vidnih sprememb vzorcev mazalnega olja po segrevanju v laboratorijski peči. V zaključku pa podajamo še FTIR-analizo razgradnih produktov olja.

3.1 Potrditev prisotnosti olja v reklamiranih svečkah

Prva faza analize je bila usmerjena v ugotavljanje, ali je v reklamiranih svečkah res prisotno mazalno olje, ki bi lahko bilo razlog za odpoved delovanja grelnega elementa. Za identifikacijo kemičnih spojin v izpraskanem magnezitu iz reklamiranih svečk smo uporabili FTIR-spektroskopijo, ki omogoča hitro in natančno zaznavanje funkcionalnih skupin v organskih snoveh. Najprej smo posneli spekter olja Zet-Cut 170/1 in identificirali značilne absorpcijske vrhove (Slika 15).



Slika 15: Spekter olja Zet-cut.

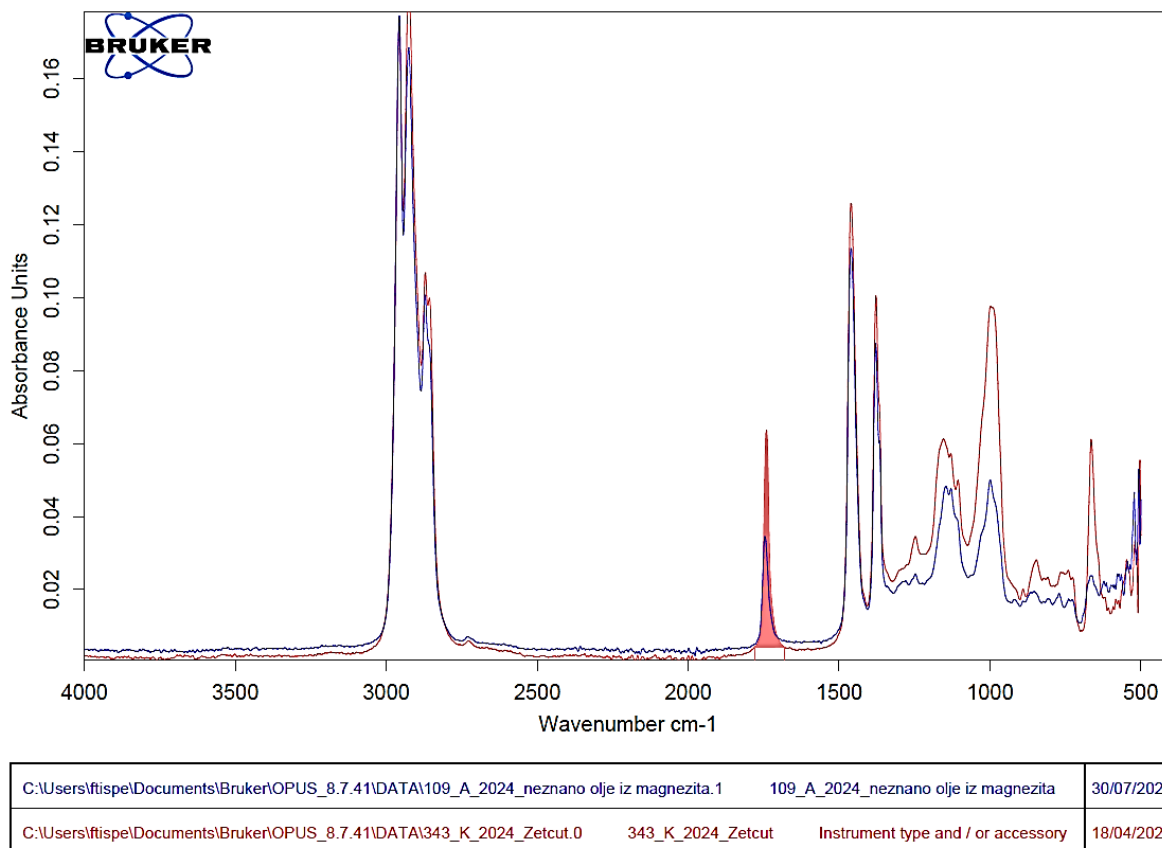
Identificirani vrhovi olja Zet-cut¹¹:

- Pri **2950 cm⁻¹** je prisoten izrazit vrh, značilen za raztezanje C–H vezi v alifatskih ogljikovodikih.
- Pri **1700 cm⁻¹** je zaznan vrh, ki ustreza karbonylni skupini (C=O) v estrih, ketonih ali aldehidih – tipičnih komponentah mazalnih olj.
- Območje **1460–1375 cm⁻¹** prikazuje absorpcijo, značilno za upogibanje CH₂ in CH₃ skupin.
- V območju **1250–1000 cm⁻¹** se pojavljajo kompleksni vrhovi, ki so povezani z raztezanjem C–O vezi, značilnimi za estrske ali alkoholne dodatke.
 - Pri **1200–1100 cm⁻¹** je opaziti absorpcijo C–S vezi trisulfidnih aditivov, kot je npr. 2-(2,3,3,4,5,5-hexamethylhexan-2-yltrisulfanyl)-2,3,3,4,5,5-hexamethylhexane (Slika 7).
 - Prekrivajoči vrhovi **pri 750–650 cm⁻¹** vključujejo vibracije C–S in S–S vezi trisulfidnih aditivov.
 - V območju **pod 600 cm⁻¹** je prisotnega veliko šuma, ker spektrometer uporablja ZnSe delilnik žarka, ZnSe pa ne prepušča IR-svetlobe pod 600 cm⁻¹.

Ekstrakt iz magnezita iz reklamiranih svečk smo primerjali s spektrom čistega mazalnega olja ZET-cut. Pri analizi smo našli veliko podobnosti v spektrih in ujemanja v karakterističnih absorpcijskih vrhovih (Slika 16, naslednja stran).

Primerjava FTIR-spektrov je potrdila prisotnost olja Zet-cut v reklamiranih svečkah. Mazalno olje je prisotno v grelnem delu svečk tudi po več mesecih delovanja v motorju. Glavne razlike med čistim in termično razpadlim oljem so v zmanjšanju kisikovih in žveplovih spojin, predvsem žveplovih, kar nakazuje, da v motorju poteka piroliza olja.

V reklamiranih svečkah smo zaznali prisotnost mazalnega olja in s tem potrdili prvo hipotezo.

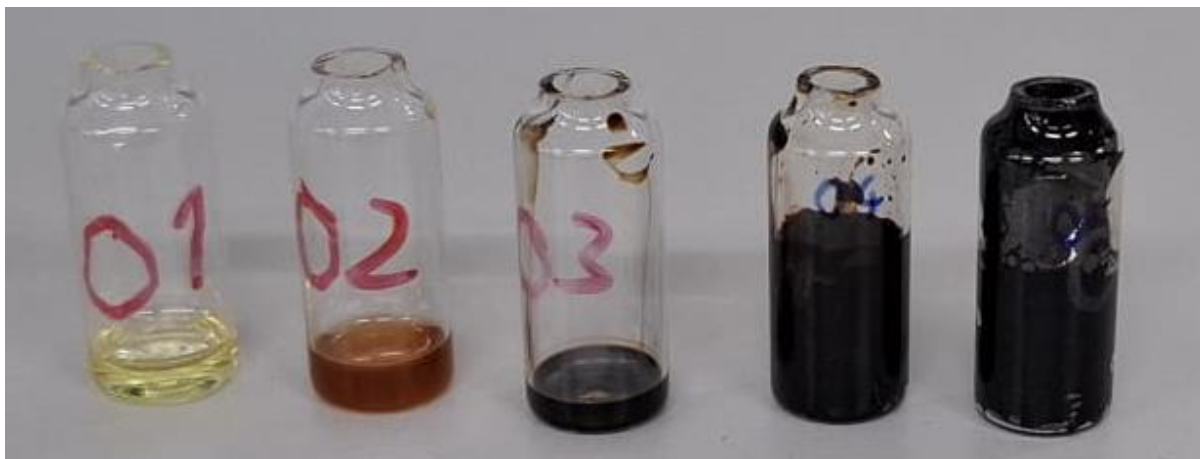


Slika 16: Primerjava spektra olja Zet-cut (rdeča krivulja) in ekstrakta iz reklamiranih svečk (modra krivulja).

3.2 Vizualna analiza termičnega razpada olja

Naš naslednji cilj je bil bolje razumeti termični razpad olja v grelcih žarilnih svečk. Vzorce olja smo segreli na temperature 100, 150, 200, 250 in 300 °C. Temperature smo izbrali na podlagi pogojev, ki jih lahko v notranjosti grelnih svečk doseže izolacijski material magnezit (MgO) med delovanjem v motorju¹⁶. Postopoma smo pripravili tri različne tipe vzorcev: olje brez dodatkov, olje z dodatkom magnezita in olje v samih grelcih svečke (glej podpoglavja 2.2, 2.3 in 2.4).

Pri 100 °C in 150 °C se je olje obarvalo rjavkasto, pri višjih temperaturah pa smo zaznali črno obarvanje, posledico začetka pirolitičnih procesov, ki vodijo do tvorbe aromatskih ogljikovodikov in sajastih struktur. Pri 250 °C je olje doseglo točko vrelišča in izparevalo, kar vidimo po kondenzaciji oljnih hlapov na notranjih stenah zadnjih dveh ampul (Slika 17).



Slika 17: Vzorci olja, ki smo jih za eno uro segreli na 100, 150, 200, 250 in 300 °C (od leve proti desni).

Pri vzorcih z dodatkom MgO so stene ampule delno zamazane že pri 100 °C (prva ampula na Sliki 18). To kaže na kataliziran razpad olja z MgO, kar je opazil tudi Stefanidis s sodelavci.¹⁷ MgO katalizira razgradnjo, kar vodi v tvorbo hlapnih produktov, zato olje zavre že pri nižji temperaturi.



Slika 18: Vzorci olja z magnezitom, ki smo jih za eno uro segreli na 100, 150, 200, 250 in 300 °C (od leve proti desni).

Namen vključitve vzorcev olja v grelcih svečk je bil čim bolj realistično simulirati pogoje, v katerih razpada olje med delovanjem motorja. Preveriti smo želeli, ali se razgradni procesi v notranjosti svečke razlikujejo od tistih, ki smo jih opazovali v laboratorijskih ampulah (Sliki 17 in 18). S tem smo želeli ugotoviti, kakšen vpliv imajo materiali grelca (npr. jeklo in magnezit) in zaprto okolje svečke na razpad olja.

Preden smo iz teh vzorcev izvedli ekstrakcijo olja s petroletrom in FTIR-analizo, smo svečke prerezali in fotografirali z digitalno lupo, da bi dokumentirali vizualne spremembe v grelcu.



Slika 19: Notranjost grelnega elementa, kontaminiranega z oljem, po segrevanju na 100 °C. Na sliki je razvidno kovinsko ohišje in grelna navitje, ki je obdano z izolacijskim MgO. MgO je na levi strani zaradi kontaminacije z oljem rahlo porumenel.



Slika 20: Notranjost grelnega elementa, kontaminiranega z oljem, po segrevanju na 150 °C.



Slika 21: Notranjost grelnega elementa, kontaminiranega z oljem, po segrevanju na 200 °C.



Slika 22: Notranjost grelnega elementa, kontaminiranega z oljem, po segrevanju na 250 °C.



Slika 23: Notranjost grelnega elementa, kontaminiranega z oljem, po segrevanju na 300 °C.

Videti je, da je olje prodrlo nekaj milimetrov globoko v notranjost grelcev. S tem se je potrdila domneva, da notranja zgradba svečke omogoča zadrževanje olja, kar omogoča kontaminacijo grelnega elementa tudi po dolgotrajni uporabi.

Barva olja se spreminja glede na temperaturo: pri grelcu, segretem na 100 °C, je olje najsvetlejša, medtem ko je pri 300 °C izrazito potemnelo. Poleg barvnih sprememb je opazna tudi razlika v intenzivnosti in globini obarvanja, kar potrjuje, da razpad olja ni enakomeren in da nanj vplivajo temperatura, dostop kisika in prisotnost kovinskih površin, ki lahko delujejo kot katalizatorji. Obarvanost je intenzivnejša v območju okoli grelnega navitja.

Opazna je tudi podobnost v barvnem odtenku med oljnimi sledmi s prejšnjima poskusoma (Sliki 17 in 18), pri čemer so sedaj barve svetlejša. To je posledica nižje koncentracije olja, saj je olje le delno prodrlo med bele delce magnezitnega prahu.

Ta vizualna analiza je dopolnila rezultate iz prejšnjega podpoglavja in potrdila realističnost eksperimentalnega modela, saj se spremembe, opažene v reklamiranih svečkah, ujemajo z opažanji iz naših pripravljenih vzorcev.

3.3 FTIR-analiza razgradnih produktov mazalnega olja

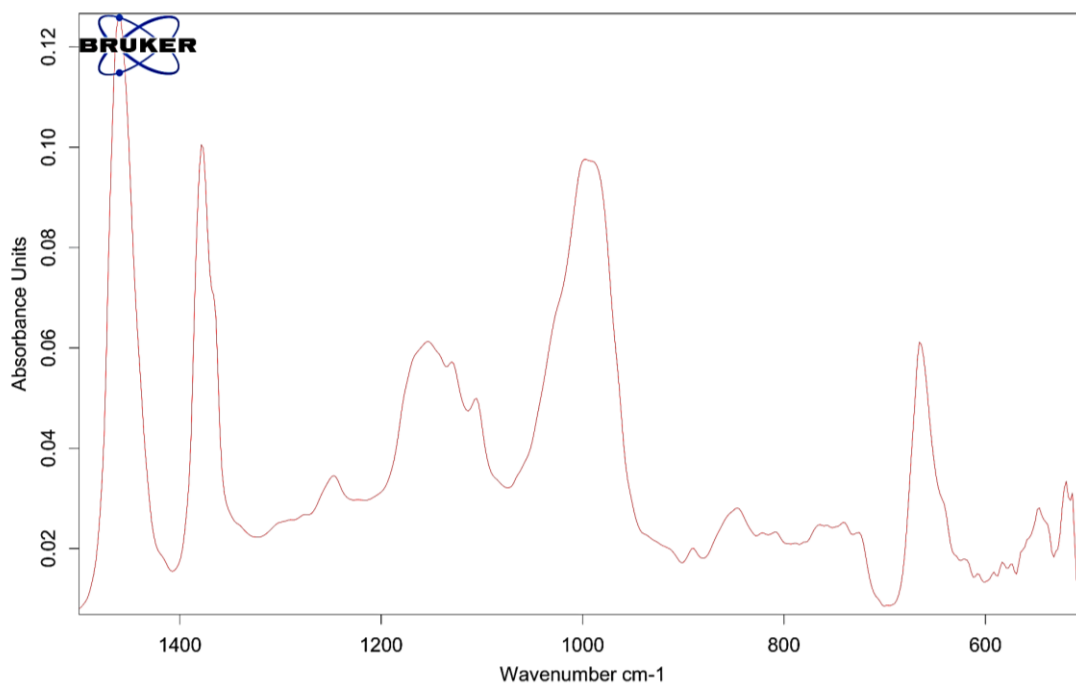
Po opazovanju vizualnih sprememb olja in svečk smo želeli natančno ugotoviti, katere kemijske spremembe se zgodijo pri segrevanju mazalnega olja Zet-cut. Z uporabo ATR-FTIR spektroskopije smo analizirali vse vzorce, segrete na različne temperature (100–300 °C), in jih primerjali s spektrom čistega olja.

FTIR-spektri vzorcev, segrelih na različnih temperaturah (Slike 25–27), kažejo postopne spremembe, povezane s termično razgradnjo olja.

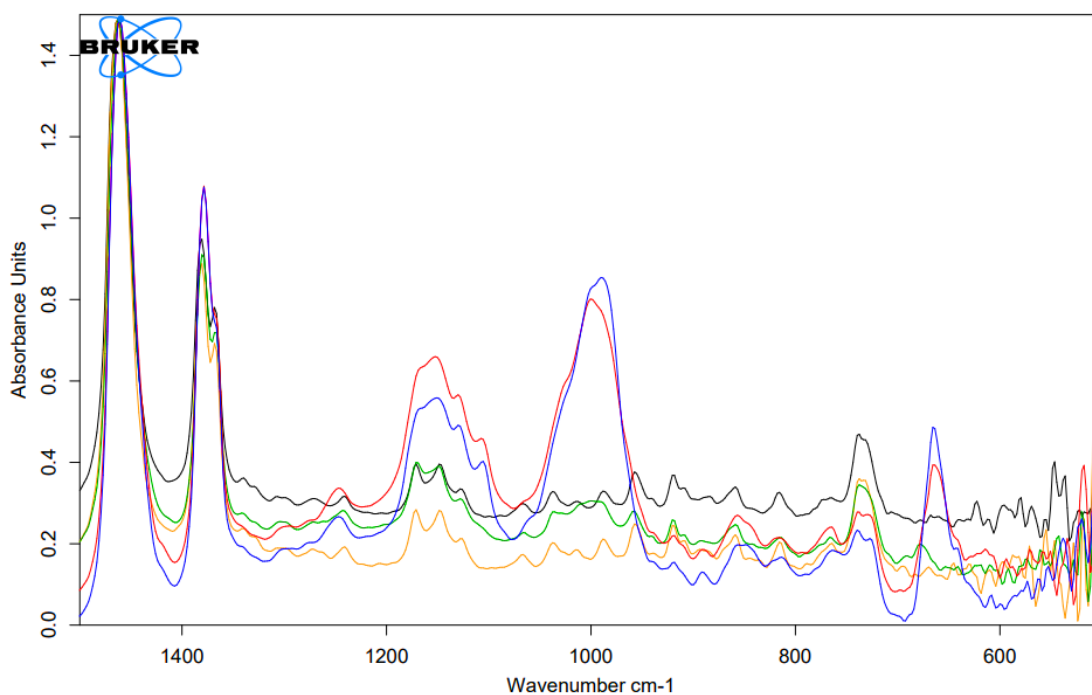
Ključne spremembe pri višanju temperature:

1. Zmanjševanje C=O in C–O vrhov (~ 1700 in $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$)

Pri višjih temperaturah (250–300 °C) ti vrhovi postanejo šibkejši ali celo izginejo, kar kaže na razgradnjo in izhlapevanje estrov iz olja. To je skladno s kemijskimi reakcijami pirolize – kompleksne molekule razpadejo, izgubljajo se polarne funkcionalne skupine.



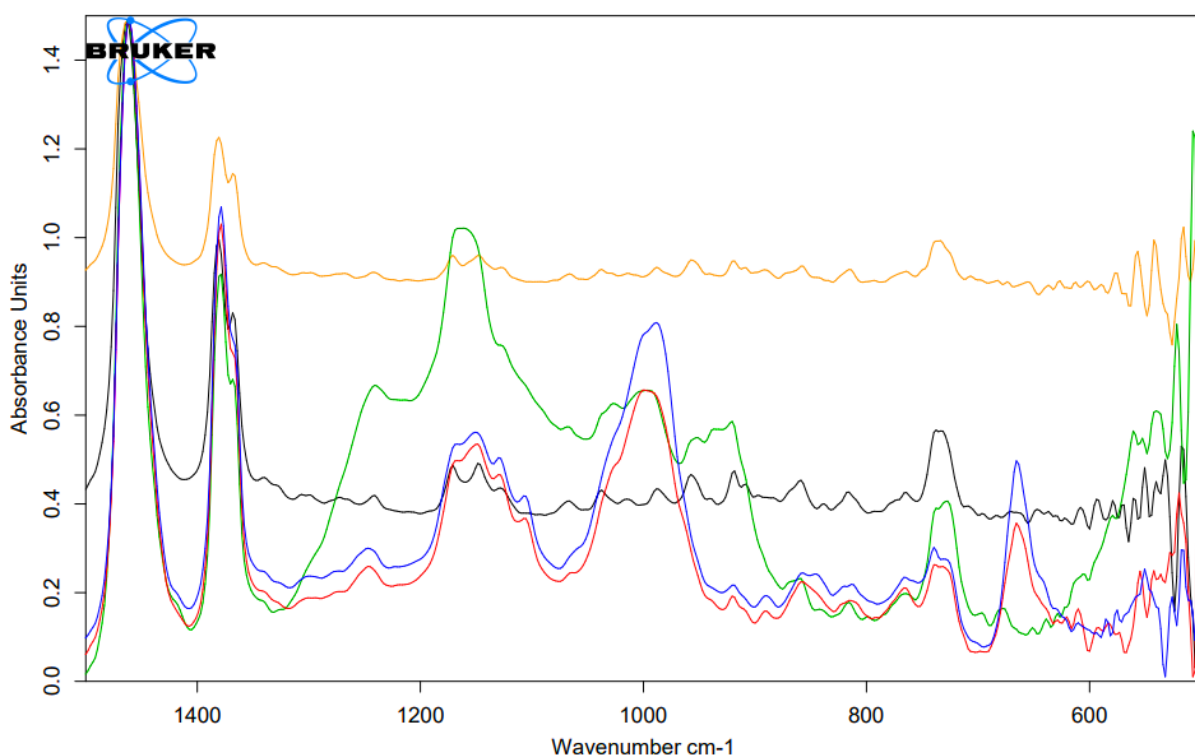
Slika 24: FTIR-spekter čistega olja Zet-cut, povečan na območje 1500–500 cm^{-1} .



C:\Users\flispe\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\21 A 2025 O 1.0	21 A 2025 O 1	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\flispe\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\22 A 2025 O 2.0	22 A 2025 O 2	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\flispe\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\23 A 2025 O 3.0	23 A 2025 O 3	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\flispe\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\24 A 2025 O 4.0	24 A 2025 O 4	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\flispe\Documents\Bruker\OPUS 8.7.41\DATA\25 A 2025 O 5.0	25 A 2025 O 5	Instrument type and / or accessory	10/02/2025

Page 1/1

Slika 25: FTIR-spektri vzorcev olja (O1–O5), ki smo jih za eno uro segreli na 100 °C (O1 – modra), 150 °C (O2 – rdeča), 200 °C (O3 – zelena), 250 °C (O4 – rumena) in 300 °C (O5 – črna). Prikazano območje 1500–500 cm^{-1} vključuje značilne vrhove za ogljikovodike, estre, sulfidne aditive in aromatske spojine.



C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\26_A_2025_M_1.0	26_A_2025_M_1	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\27_A_2025_M_2.0	27_A_2025_M_2	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\28_A_2025_M_3.0	28_A_2025_M_3	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\29_A_2025_M_4.0	29_A_2025_M_4	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\31_A_2025_M_5_ponovitev.0	31_A_2025_M_5_ponovitev	Instrument type and / or accessory	10/02/2025

Page 1/1

Slika 26: FTIR-spektri vzorcev olja z magnezitom (M1–M5), ki smo jih za eno uro segreti na 100 °C (M1 – modra), 150 °C (M2 – rdeča), 200 °C (M3 – zelena), 250 °C (M4 – rumena) in 300 °C (M5 – črna).

2. Pojav novega vrha pri $\sim 750\text{ cm}^{-1}$

Ta absorpcija je povezana z aromatskimi C–H nihanjmi, značilnimi za policiklične aromatske spojine (PAH). Novi vrh se začne pojavljati pri 200 °C in se ohranja pri 250 °C in 300 °C, kar potrjuje nastanek aromatskih spojin pri visokih temperaturah.

3. Prisotnost trisulfidnih spojin ($1100\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ in $650\text{--}750\text{ cm}^{-1}$)

Vrhovi v tem območju se začnejo zmanjševati že pri 100 °C in so pri 300 °C še komaj zaznavni, kar nakazuje na termični razpad.

4. Vrhovi pri 1350 in 1450 cm^{-1}

Ti ostajajo prisotni pri vseh temperaturah in so značilni za alifatske CH_2/CH_3 skupine, čeprav njihova intenzivnost upada pri višjih temperaturah – znak zmanjševanja alifatskega deleža spojin in povečevanje grafitnih in aromatskih spojin.

5. Odsotnost vrhov pri $\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ ($-\text{CH}=\text{CH}-\text{trans}$)

Ti vrhovi so izraženi pri nižjih temperaturah (do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$), vendar pri višjih temperaturah izginejo, kar potrjuje prehod iz nenasičenih v aromatske strukture.

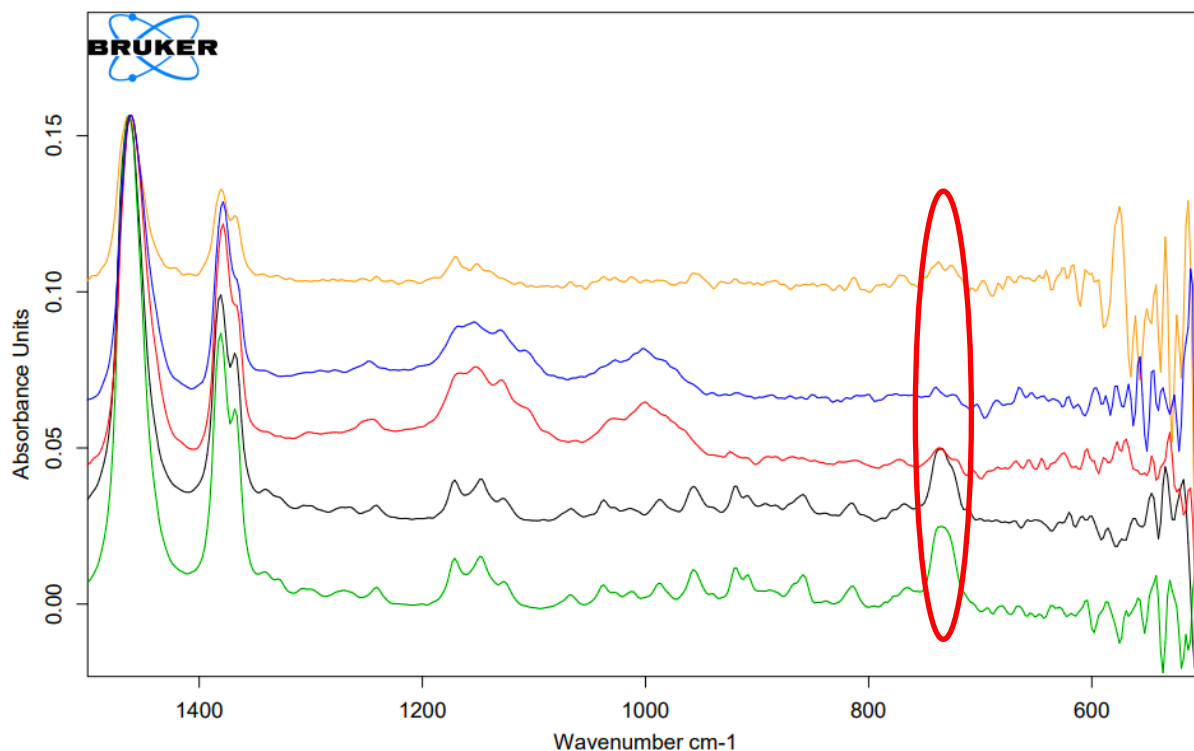
Prisotnost aromatskih spojin pri višjih temperaturah potrjuje tudi opažanja iz vizualne analize (podpoglavje 3.2), kjer so se grelci močno potemnil – verjetno zaradi nastanka sajastih ogljikovih struktur, ki znižujejo električno upornost olja.

FTIR-analiza razgradnih produktov je potrdila hipotezo, da se pri segrevanju mazalnega olja tvorijo nove, kemično različne spojine – med njimi tudi aromatske. Najbolj izrazite razlike se pojavijo nad $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar sovпада z realnimi pogoji znotraj grelca med delovanjem v motorju. Ti produkti niso zgolj posledica temperature, temveč tudi vpliva materialov (MgO , jeklo), ki se nahajajo v grelcu.

V primerjavi z jeklom, ki se običajno uporablja kot konstrukcijski material v grelnih elementih zaradi svoje mehanske trdnosti in ugodne cene, številni drugi proizvajalci svečk brez elektronskega krmiljenja uporabljajo plemenite kovine, kot sta iridij ali platina, kot material za grelni del svečke.¹³ Ti materiali so znatno bolj kemično inertni in odporni na oksidacijo ter termično degradacijo. Posledično je njihova interakcija z mazalnim oljem minimalna, kar vodi do manjšega nastanka razgradnih produktov.

Material jeklo, še posebej če vsebuje katalitsko aktivne sestavine (npr. železo, nikelj, krom), lahko deluje kot heterogeni katalizator pri termooksidaciji mazalnega olja. V prisotnosti kisika in povišane temperature tako spodbuja razgradnjo ogljikovodikovih verig ter nastanek oksidiranih in aromatskih spojin.¹⁵ Poleg tega lahko površinska hrapavost in oksidirane plasti jekla dodatno prispevajo k adsorpciji produktov razgradnje in nastajanju oblog, kar lahko sčasoma vpliva na delovanje svečke.

Čeprav so svečke z grelnimi elementi iz iridija ali platine bistveno dražje, se v praksi izkažejo za stabilnejše. V kontekstu elektronsko krmiljenih svečk Hidrie, kjer so pogoji delovanja svečke natančneje nadzorovani, pa lahko tudi manj odporni materiali, kot je jeklo, še vedno zagotavljajo ustrezno funkcionalnost – vendar z večjim tveganjem za kemijske reakcije.



C:\Users\ftispel\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\15_A_2025_G_1.1	15_A_2025_G_1	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispel\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\20_A_2025_G_2_ponovitev.0	20_A_2025_G_2_ponovitev	Instrument type and /	10/02/2025
C:\Users\ftispel\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\17_A_2025_G_3.0	17_A_2025_G_3	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispel\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\18_A_2025_G_4.0	18_A_2025_G_4	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispel\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\19_A_2025_G_5.0	19_A_2025_G_5	Instrument type and / or accessory	10/02/2025

Page 1/1

Slika 27: FTIR-spektri vzorcev olja v svečkah (G1–G5), ki smo jih za eno uro segreli na 100 °C (G1 – modra), 150 °C (G2 – rdeča), 200 °C (G3 – zelena), 250 °C (G4 – rumena) in 300 °C (G5 – črna). Z rdečim krogom je označen spektralni vrh aromatskih spojin.

3.4 Nastanek prevodnih sajastih spojin

Ena izmed osrednjih hipotez te raziskovalne naloge je, da se med termičnim razpadom mazalnega olja v grelcu žarilne svečke tvorijo prevodne sajaste spojine, ki lahko povzročijo električni kratek stik. S pomočjo FTIR spektroskopije in vizualne analize vzorcev smo pridobili dokaze, ki podpirajo to domnevo.

Najmočnejši pokazatelji nastanka aromatskih spojin so izraženi vrhovi pri $\sim 750\text{ cm}^{-1}$, ki so značilni za C–H vezi v policikličnih aromatskih ogljikovodikih (PAH). Ti vrhovi so se začeli pojavljati pri 200 °C. Zanimivo pa je, da je pri 250 °C ta vrh nekoliko manj izrazit kot pri 200 °C, kar lahko pomeni, da so enostavnejše aromatske strukture izhlapevale ali pa so začele kondenzirati. S tem so se preoblikovale v večje, manj IR-aktivne agregate (npr. saje). Pri 300 °C se signal ponovno okrepi, kar kaže, da se tvori stabilnejša oblika aromatsko bogatih spojin.

Med pirolizo se dolge alifatske verige olja najprej razcepijo na krajše fragmente, ki nato ciklizirajo in tvorijo aromatske obročje. Posamezne aromatske molekule (npr. benzen ali policiklični aromatski ogljikovodiki – PAH) same po sebi niso električno prevodne, saj so njihovi π -elektroni ujeti znotraj posameznih obročev. Z nadaljnjo aromatizacijo in kondenzacijo teh obročev nastanejo planarne strukture, v katerih se π -elektroni delokalizirajo in lahko tvorijo prevodne poti. Ko te strukture dosežejo zadostno stopnjo konjugacije, pridobijo delno grafitno naravo. Ta pojav termičnega razpada mineralnih olj so opisali že Yan in sodelavci,¹⁵ ki so popisali nastanek ogljikovih mikrodolcev, ki so znižali električno upornost dielektričnega sistema.

Na osnovi podatkov FTIR-analize in vidnega nastanka črnih saj pri vzorcih domnevamo, da so nastale aromatske in sajaste spojine zmanjšale izolativnost MgO prahu. To bi lahko omogočilo, da tok preskoči iz grelnega navitja na kovinsko ohišje svečke, kar vodi v kratek stik. S tem se svečka preneha segrevati.

Hipoteza, da se z višanjem temperature tvorijo prevodne aromatske spojine, je s tem delno potrjena – za popolno potrditev bi bila potrebna še neposredna meritev električne upornosti.

3.5 Ukrepi za zmanjšanje reklamacij svečk

Na podlagi rezultatov raziskave smo ugotovili, da je kontaminacija grelnega dela žarilne svečke z mazalnim oljem eden izmed možnih razlogov za prezgodnje odpovedi svečk. FTIR spektroskopija je potrdila prisotnost mazalnega olja v reklamiranih svečkah, prav tako pa tudi razgradne produkte, med katerimi so aromatske in potencialno prevodne spojine. Za preprečevanje kontaminacije svečke z mazalnim oljem predlagamo več tehničnih in postopkovnih ukrepov:

- Zamenjava tesnilnega obroča (O-ring).
- Zamenjava mazalnega olja s takim, ki je manj občutljivo na termični razpad.
- Zmanjšanje količine uporabljenega mazalnega olja.
- Izboljšanje postopka sestavljanja, da se izognemo fazam, pri katerih lahko pride do vdora olja v grelec.
- Dodaten izpih ohišja svečke s komprimiranim zrakom ali drugačno čiščenje ohišja pred zapiranjem svečke.
- Zmanjšanje praznih prostorov v magnezitu, kamor pronica olje, kar bi lahko dosegli z uporabo manjših delcev magnezita, z manjšo poroznostjo magnezita in z močnejšim stiskanjem magnezita v ohišje.

4 ZAKLJUČEK

V raziskovalni nalogi smo s pomočjo FTIR spektroskopije preučevali prisotnost in razgradnjo mazalnega olja Zet-cut 170/1 v grelcih žarilnih svečk, ki jih proizvaja podjetje Hidria. Izhajali smo iz hipoteze, da kontaminacija z oljem med sestavljanjem svečke lahko privede do kratkega stika, ko se zaradi termičnega razpada prevodnost olja dovolj poveča.

Ključne ugotovitve raziskave:

- Z ATR-FTIR spektroskopijo smo potrdili, da je v reklamiranih svečkah prisotno mazalno olje, katerega spekter se ujema z oljem Zet-cut 170/1, ki ga uporabljajo v proizvodnji svečk.
- Med segrevanjem olja smo opazili jasno stopnjevanje razgradnje olja z višanjem temperature. Posebej nad 200 °C iz FTIR spektrov razberemo razpadanje kisikovih in žveplovih spojine, kar kaže na pirolitične procese.
- Pri 250 °C in 300 °C smo odkrili FTIR vrhove pri $\sim 750\text{ cm}^{-1}$, značilne za aromatske C–H skupine, ter opazili vidno potemnitev olja, kar kaže na tvorbo sajastih struktur.
- Vzorci olja znotraj grelcev so se po sestavi ujemali z oljem iz reklamiranih svečk, kar potrjuje, da smo izbrali primerne laboratorijske pogoje.

Potrditev hipotez:

1. Prisotnost mazalnega olja v svečkah smo potrdili z ujemanjem FTIR spektrov.
2. Zaznali smo razgradne produkte olja.
3. Potrdili smo nastanek aromatskih in sajastih spojin pri temperaturah nad 200 °C, kar deloma potrjuje tudi njihovo morebitno vlogo pri okvari svečk.

Praktični pomen:

Rezultati naše raziskave so pomembni za podjetje Hidria, saj:

- ponujajo zanesljivo metodo odkrivanja kontaminacije z oljem v svečkah,
- omogočajo razumevanje kemijskih sprememb olja med segrevanjem
- in nakazujejo možne tehnične ukrepe za preprečevanje reklamacij.

Možnosti nadaljnjih raziskav:

V prihodnosti bi lahko izvedli nadaljnje raziskave, na primer izmerili električne prevodnosti razpadnih produktov, da bi neposredno dokazali vpliv na kratki stik, preizkusili alternativna maziva, ki so bolj termično obstojna, ali analizirali olje brez prisotnosti kisika, saj so realne razmere v grelcu bolj anaerobne.

5 VIRI IN LITERATURA

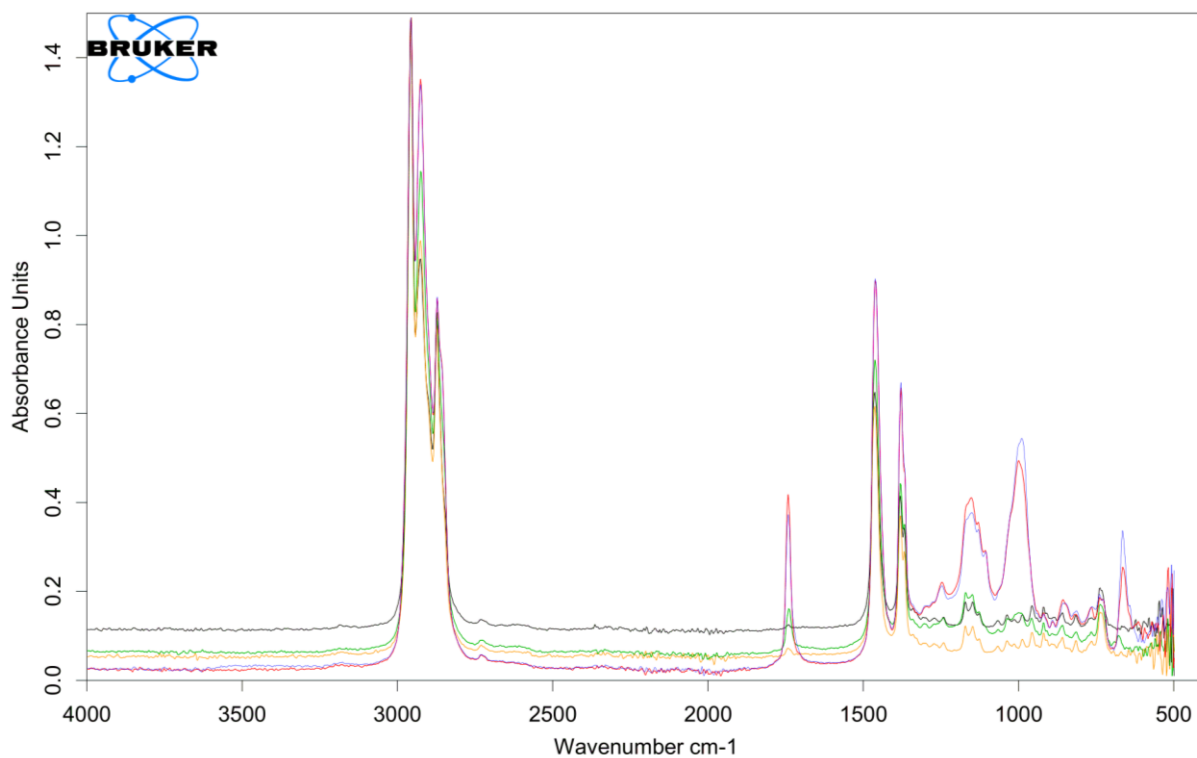
1. Hidria, d.o.o. *Spoznajte nas* (online). (citirano 10. 3. 2025). Dostopno na naslovu: <https://www.hidria.com/int/sl/o-nas/spoznajte-nas>.
2. Golja, B. *Karakterizacija napak materiala pri izdelavi ogrevalne čepne svečke*: Diplomsko naloga. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, 2013.
3. M.J. *Zakaj dizli porabijo manj goriva od bencincev?* (online). 2023. (citirano 8. 3. 2025). Dostopno na naslovu: <https://www.zurnal24.si/avto/iz-druge-roke/zakaj-dizli-porabijo-manj-goriva-od-bencincev-415224>.
4. Hidria, d.o.o. *Ogrevalne svečke* (online). (citirano 9. 3. 2025). Dostopno na naslovu: <https://www.hidria.com/int/sl/izdelki-in-resitve/avtomobilske-tehnologije/ogrevalne-svecke>.
5. Pihlar, B. *Osnove analizne kemije*: zapiski predavanj. Ponatis. Ljubljana: Založba Fakultete za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Ljubljani, 2009. ISBN 978-1-86094-876-3.
6. Hribar, M., Kocjančič, S. in drugi. *Elektrika, svetloba, snov: Fizika za 3. in 4. letnik srednjih šol*. Modrijan. Ljubljana: Modrijan, 2009. ISBN 978-961-6183-48-2.
7. Almalih, J. R. *Introduction to Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)* (online). 2024. (citirano 6. 4. 2025). Dostopno na naslovu: https://www.researchgate.net/publication/385974233_Introduction_to_Fourier_Transform_Infrared_Spectroscopy_FTIR.
8. Boslaugh, S. *Pyrolysis* (online). 2025. (citirano 7. 4. 2025). Dostopno na naslovu: <https://www.britannica.com/science/pyrolysis>.
9. *Pyrolysis* (online). (citirano 14. 3. 2025). Dostopno na naslovu: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pyrolysis>.
10. *Aromatičnost* (online). (citirano 16. 3. 2025). Dostopno na naslovu: <https://sl.m.wikipedia.org/wiki/Aromatičnost>.
11. Bruker Optics. *Guide for Infrared Spectroscopy* (online). 2009. (citirano 5. 3. 2025). Dostopno na naslovu: <https://www.ccmr.cornell.edu/wp-content/uploads/sites/2/2015/11/GuideforInfrared-spectroscopy.pdf>.
12. Bruker Optics. *Infrared and Raman* (online). 2009. (citirano 31. 3. 2025). Dostopno na naslovu: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy.html>.
13. *Glow plugs* (online). (citirano 31. 3. 2025). Dostopno na naslovu: https://en.wikipedia.org/wiki/Glow_plug.

14. Kus, M. *Vpliv dinamične omočljivosti na trenje*: Doktorska disertacija (online). (citirano 10. 2. 2025). Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2019. Dostopno na naslovu: <https://repositorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=113364>.
15. Yan, W., Yang, L., Cui, H., Ge, Z., Li, S., & Li, S. Comparison of degradation mechanisms and aging behaviors of palm oil and mineral oil during thermal aging. *Condition Monitoring and Diagnosis*, 2018, str. 1-6.
16. Endiz, M. S., Özcan, M., Erişmiş, M. A., Yağcı, M., & Günay, H. The simulation and production of glow plugs based on thermal modeling. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2015, št. 23, str. 2197–2207.
17. Stefanidis, S. D., Karakoulia, S. A., Kalogiannis, K. G., Iliopoulou, E. F., Delimitis, A., Yiannoulakis, H., Zampetakis, T., Lappas, A. A., & Triantafyllidis, K. S. Natural Magnesium Oxide (MgO) catalysts: A cost-effective sustainable alternative to acid zeolites for the in situ upgrading of biomass fast pyrolysis oil. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, št. 196, str. 155-173.

6 PRILOGE

Tabela 1: Pogoji staranja vzorcev pri različnih temperaturah.

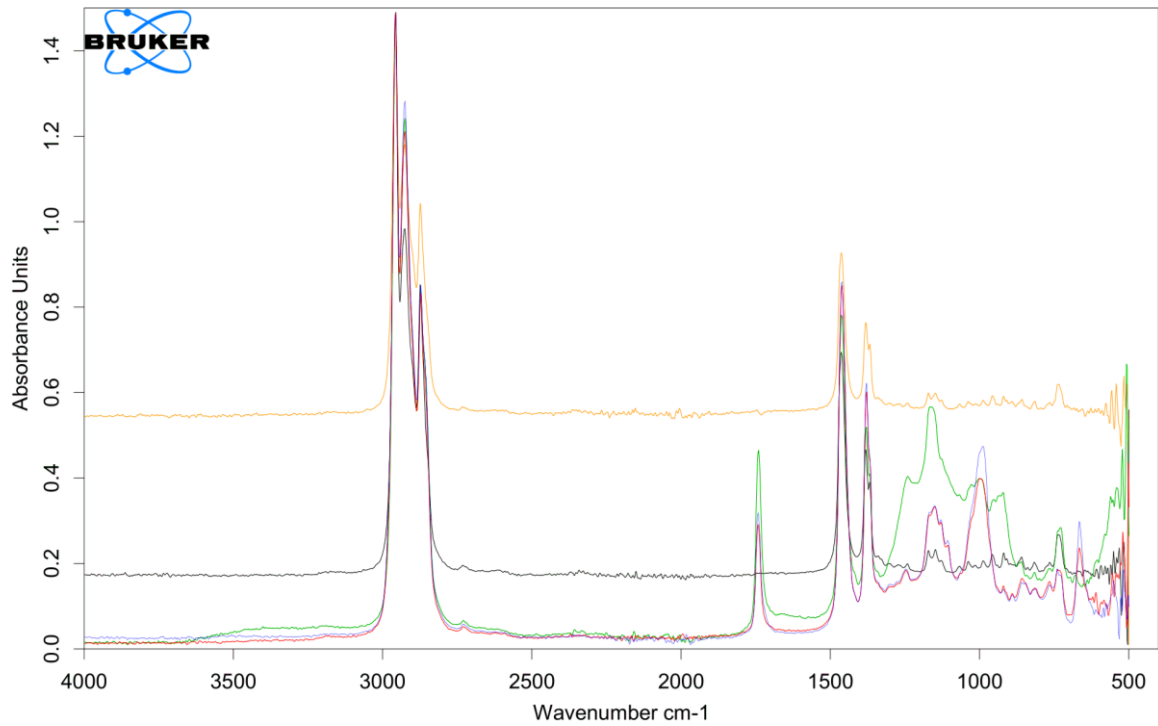
temperatura [°C]	100	150	200	250	300
olje	O1	O2	O3	O4	O5
olje + magnezit	M1	M2	M3	M4	M5
olje + grelci svečke	G1	G2	G3	G4	G5



C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\21_A_2025_O_1.0	21_A_2025_O_1	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\22_A_2025_O_2.0	22_A_2025_O_2	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\23_A_2025_O_3.0	23_A_2025_O_3	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\24_A_2025_O_4.0	24_A_2025_O_4	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\25_A_2025_O_5.0	25_A_2025_O_5	Instrument type and / or accessory	10/02/2025

Page 1/1

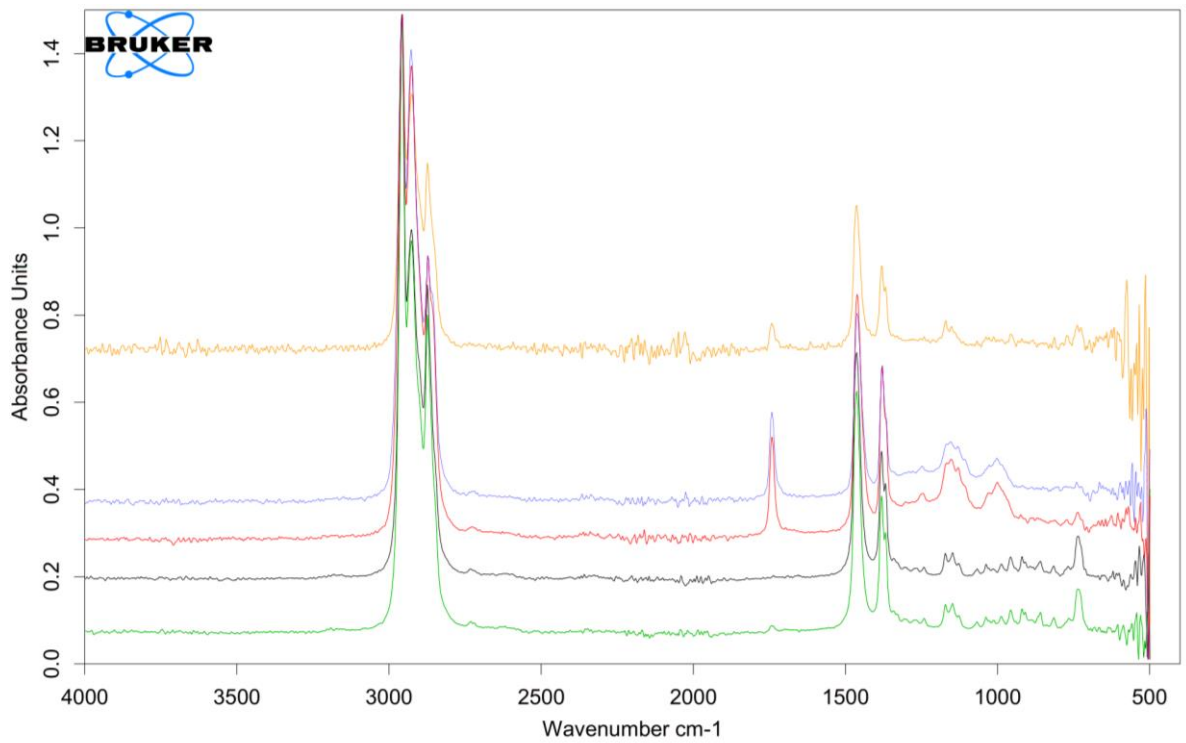
Slika 28: Celoten FTIR-spekter vzorcev O1–O5.



C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\26_A_2025_M_1.0	26_A_2025_M_1	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\27_A_2025_M_2.0	27_A_2025_M_2	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\28_A_2025_M_3.0	28_A_2025_M_3	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\29_A_2025_M_4.0	29_A_2025_M_4	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\31_A_2025_M_5_ponovitev.0	31_A_2025_M_5_ponovitev	Instrument type and /	10/02/2025

Page 1/1

Slika 29: Celoten FTIR-spekter vzorcev M1–M5.



C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\15_A_2025_G_1.1	15_A_2025_G_1	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\20_A_2025_G_2_ponovitev.0	20_A_2025_G_2_ponovitev	Instrument type and /	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\17_A_2025_G_3.0	17_A_2025_G_3	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\18_A_2025_G_4.0	18_A_2025_G_4	Instrument type and / or accessory	10/02/2025
C:\Users\ftispe\Documents\Bruker\OPUS_8.7.41\DATA\19_A_2025_G_5.0	19_A_2025_G_5	Instrument type and / or accessory	10/02/2025

Page 1/1

Slika 30: Celoten FTIR-spekter vzorcev G1–G5.