

# Određivanje optimalnog intervala zamjene ulja u plinskim motorima Waukesha VGF H24GL

---

**Burger, Danijel**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:900006>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-05**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu  
Strojarski odjel  
Specijalistički diplomski stručni studij strojarstva

Danijel Burger

**ODREĐIVANJE OPTIMALNOG INTERVALA  
ZAMJENE ULJA U PLINSKIM MOTORIMA  
WAUKESHA VGF H24GL**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2016

Veleučilište u Karlovcu  
Strojarski odjel  
Specijalistički diplomski stručni studij strojarstva

Danijel Burger

**ODREĐIVANJE OPTIMALNOG INTERVALA  
ZAMJENE ULJA U PLINSKIM MOTORIMA  
WAUKESHA VGF H24GL**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc. Josip Hoster

Karlovac, 2016



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J. Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## **VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

Specijalistički studij: STROJARSTVO

Usmjerenje: PROIZVODNO STROJARSTVO

Karlovac, 03.11.2016.

### **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Student: DANIJEL BURGER

Matični broj: 0111411024

Naslov: Određivanje optimalnog intervala zamjene ulja u plinskim motorima Waukesha VGF H24GL

Opis zadatka:

Zadatak završnog rada je opisati kriterije za ocjenu stupnja degradacije maziva u plinskim motorima Waukesha VGF H24GL. Potrebno je opisati izvore degradacije svojstava i kvalitete maziva. Potrebno je opisati postupak dijagnostike kvalitete i stupnja degradacije maziva i vezu s trošenjem čvrstih dijelova tribomehaničkog sustava. Prikazati metode analize kontaminata u mazivu. Opisati ovisnost brzine i stupnja degradacije ulja u ovisnosti o brzini i stupnju kontaminacije. Opisati FT-IR analizu i ostale fizikalno kemijske metode te njihov značaj u određivanju optimalnog intervala zamjene ulja. Opisati vezu veličine, oblika i sastava čestica u analiziranom mazivu sa stupnjem istrošenosti motora te odlukom o zamjeni maziva.

Rezultate analiza prikazati u obliku tablica i dijagrama, ovisno o vrsti rezultata.

Koristiti stručnu literaturu, tehničke propise i dokumentaciju iz navedenog područja. Redovito održavati konzultacije s mentorom te rad uskladiti s Pravilnikom o završnim radovima i ispitima Veleučilišta u Karlovcu.

Zadatak zadan:  
03.11.2016.

Rok predaje rada:  
09.12.2016.

Predviđeni datum obrane:  
16.12.2016.

Mentor:

dr.sc. Josip Hoster

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Marijan Brozović, dipl.ing. v.p.

## PREDGOVOR

Analiza ulja na osnovu pravilno definiranog programa predstavlja efikasnu metodu monitoringa stanja tehničkih sustava koja osigurava rane upozoravajuće znakove potencijalnih problema, koji vode zastoju tehničkih sustava. Analiza ulja je efikasan alat za monitoring stanja tehničkih sustava.

Mnogobrojni uređaji i testovi za analizu ulja omogućavaju kvalitetan monitoring i dijagnosticiranje problema koji nastaju u procesu podmazivanja. Korištenjem raznih metoda za analizu motornih ulja, skraćuje se neplanirano vrijeme zastoja motora, poboljšava pouzdanost motora, produžuje radni vijek motora, optimizira interval zamjene ulja i smanjuju troškovi održavanja motora.

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno uz stručnu pomoć mentora, dr.sc. Josipa Hostera, kojem se iskreno zahvaljujem.

Također se zahvaljujem kolegama iz INA d.d. na ustupljenim laboratorijskim analizama koje su mi mnogo pomogle prilikom pisanja Završnog rada. Posebno se zahvaljujem svojoj supruzi Nataši na svesrdnoj potpori tijekom studija, bez koje ovaj rad ne bi bio moguć.

Danijel Burger

## SAŽETAK

Potreba za što učinkovitijim održavanjem i mogućnošću kontinuiranog korištenja tehničkih sustava razvila je čitav niz strategija i metoda održavanja opreme. Strategija održavanja po stanju, koja zahtijeva stalno praćenje i uvid u stanje opreme, uvjetovala je razvoj i primjenu analize ulja. Ovakva analiza, osim stanja maziva, daje sliku stanja opreme tijekom cijelog procesa korištenja bez nepotrebnih gubitaka zbog zaustavljanja opreme. U ovome radu prikazani su rezultati analize ulja tijekom primjene u plinskim motorima WAUKESHA VGF H24GL, FT-IR analizom i fizikalno kemijskim metodama s ciljem ocjene mogućnosti praćenja stanja plinskih motora pomoću analize ulja.

Ključne riječi: monitoring, održavanje tehničkih sustava, analiza ulja.

## ABSTRACT

The need for more effective maintenance and possibility of continuous exploitation of technical systems has developed numerous strategies and methods for machinery maintenance. The maintenance strategy by condition, that requires continuous monitoring and equipment overlook, has initiated the development and use of oil analysis. In this work are presented the results of oil analysis examination during application in gas engines WAUKESHA VGF H24GL by FT-IR analysis and physico-chemical methods in order to evaluate possibilities of gas engine condition monitoring by oil analysis.

Key words: monitoring, maintenance of technical systems, oil analysis.

# SADRŽAJ

|  |     |
|--|-----|
| ZAVRŠNI ZADATAK.....   | I   |
| PREDGOVOR.....   | II  |
| SAŽETAK.....   | III |
| SADRŽAJ.....   | IV  |
| <br>   |     |
| 1. UVOD.....   | 3   |
| 2. ULJA ZA PODMAZIVANJE.....   | 4   |
| 2.1 KARAKTERISTIKE MOTORNIH ULJA.....  | 8   |
| 2.1.1. VISKOZNOST ULJA.....  | 8   |
| 2.1.2. GUSTOĆA ULJA.....   | 9   |
| 2.1.3. PLAMIŠTE ULJA.....  | 10  |
| 2.1.4. STINIŠTE ULJA.....  | 10  |
| 2.1.5. SADRŽAJ SULFATNOG PEPELA.....   | 10  |
| 2.1.6. UKUPNI KISELINSKI BROJ (TAN).....   | 10  |
| 2.1.7. UKUPNI BAZNI BROJ (TBN).....  | 11  |
| 2.1.8. KLASIFIKACIJA ULJA (SAE).....   | 12  |
| 3. KONTAMINACIJA I DEGRADACIJA ULJA ZA PODMAZIVANJE.....                           | 13  |
| 3.1. KONTAMINACIJA ULJA PRIJE UPOTREBE.....  | 13  |
| 3.2. KONTAMINACIJA ULJA U TOKU UPOTREBE.....                                       | 14  |
| 4. OSNOVNI CILJEVI ANALIZE I MONITORINGA ULJA TIJEKOM<br>EKSPLOATACIJE MOTORA..... | 20  |
| 4.1. ANALIZA PROCESA TROŠENJA.....   | 20  |
| 4.2. ANALIZA PROCESA KONTAMINACIJE ULJA.....                                       | 23  |
| 4.3. PRAĆENJE PROMJENA U SVOJSTVIMA ULJA.....                                      | 24  |
| 4.4. UTVRĐIVANJE UZROKA OŠTEĆENJA.....   | 26  |
| 5. MONITORING STANJA KROZ TESTOVE ANALIZE ULJA.....                                | 28  |
| 5.1. SPEKTROMETRIJSKA ANALIZA.....   | 29  |
| 5.2. ANALITIČKA FEROGRAFIJA.....   | 31  |
| 5.3. INFRACRVENA ANALIZA (FT-IR).....  | 32  |

|  |    |
|--|----|
| 6. ANALIZA ULJA U PLINSKIM MOTORIMA WAUKESHA H24GL.....  | 33 |
| 6.1. TEHNIČKI OPIS KOMPRESORSKE STANICE SA INSTALIRANIM<br>PLINSKIM MOTORIMA WAUKESHA H24GL..... | 33 |
| 6.2. OPIS ANALIZE ULJA U PLINSKIM MOTORIMA WAUKESHA H24GL.....                                   | 35 |
| 6.3. REZULTATI PRAĆENJA FIZIKALNO-KEMIJSKIH SVOJSTAVA ULJA IZ<br>MOTORA WAUKESHA H24GL.....      | 40 |
| 7. ZAKLJUČAK.....  | 49 |
| 8. LITERATURA.....   | 50 |
| 9. PRILOZI.....  | 51 |
| 9.1. POPIS SIMBOLA.....  | 51 |
| 9.2. POPIS SLIKA.....  | 52 |
| 9.3. POPIS TABLICA.....  | 53 |



## 1. UVOD

Za određivanje vrste maziva, učestalost podmazivanja i količinu potrebno je poštivati zahtjeve proizvođača tehničkih sustava, iskustvo, laboratorijska ispitivanja ili savjete stručnjaka i ovlaštenih dobavljača maziva. Racionalizacija potrošnje maziva predstavlja značajan zadatak, koji se uspješno može ostvariti pravovremenom zamjenom maziva. Time se osigurava maksimalni period zamjene, uz istovremeno dovoljno kvalitetno podmazivanje. S obzirom na primarnu ulogu maziva da reducira negativne efekte triboloških procesa u pogledu trenja, trošenja i rasta temperature u tribomehaničkim sustavima, svi modeli održavanja uključuju podmazivanje kao iznimno važan dio ukupne procedure. S druge strane, mazivo je, kao kontaktni element sustava, nosioc informacija o stanju cijelog sustava sa aspekta triboloških i drugih procesa starenja. Zbog toga analiza ulja na bazi pravilno definiranog programa predstavlja efektivnu metodu monitoringa stanja tehničkih sustava koji osigurava rane upozoravajuće znakove potencijalnih problema, koji vode prema zastoju tehničkih sustava.

U strukturi sustava, osim mehaničkih komponenti, stanje mijenja i samo mazivo, što vodi gubitku podmazujućih svojstava. Postoje brojne mogućnosti za kontaminaciju ulja, a time i za njihovu degradaciju. Kontaminacija i degradacija ulja u eksploataciji ne mogu se potpuno spriječiti, ali se mogu znatno usporiti, što je iznimno važno i za ulje i za tehnički sustav. Brzina i stupanj degradacije ulja upravo su proporcionalni brzini i stupnju kontaminacije. Zbog toga je važno spriječiti brzu kontaminaciju ulja, prije i u toku upotrebe. Spektar kontaminanata ulja dosta je širok. Svaki kontaminant utječe destruktivno na ulje, umanjujući mu fizikalno-kemijske i radne osobine, a posljedice su skraćenje vijeka ulja i tehničkog sustava.

Naime, zastoj tribomehaničkog sustava može nastupiti uslijed promjene svojstava ulja za podmazivanje ili promjena karakteristika ulja za podmazivanje, kao i uslijed zastoja pojedinih ostalih elemenata tribomehaničkog sustava. Mnogobrojni uređaji i testovi za analizu ulja su razvijeni i nastavljaju se razvijati, kako bi se omogućio što kvalitetniji monitoring i dijagnosticiranje problema nastalih u procesu podmazivanja. U ovome radu prikazana je metoda određivanja optimalnog intervala zamjene ulja u plinskim motorima Waukesha VGF H24GL kojom se značajno umanjuju troškovi održavanja plinskih motora i povećava pouzdanost.

## 2. ULJA ZA PODMAZIVANJE

Maziva su kemijske tvari specifičnih fizikalnih i kemijskih svojstava koje se rabe za podmazivanje. Djeluju tako što smanjuju trenje između kliznih ploha koje se pod opterećenjem nalaze u međusobnom relativnom gibanju. Maziva služe i za smanjenje trošenja strojnih dijelova i za odvođenje topline, te za zaštitu od korozije i stvaranja naslaga i taloga zbog oksidacije i drugih kemijskih promjena. Kao prva maziva upotrebljavala su se životinjska i biljna ulja i masti sve do prije stotinjak godina, kada je mlada naftna industrija iznijela na tržište maziva ulja dobivena od teških naftnih frakcija. Danas svijest o potrebi očuvanja okoliša i zdravlja utječe i na proizvodnju svih vrsta maziva, tako da se iz njih isključuju sastojci štetni za zdravlje i okoliš, a u pojedinim se područjima rabe i biološki razgradiva maziva na osnovi biljnih ulja ili sintetskih esterskih ulja. Prema agregatnom stanju razlikuju se tekuća maziva (ulja), polučvrsta (mazive masti) i čvrsta maziva.

Tekuća maziva najvažnija su vrsta maziva. Sastoje se od baznog ulja i aditiva. Bazno ulje može biti mineralno ili sintetičko. Mineralno bazno ulje proizvodi se rafinacijom teških frakcija nafte dobivenih vakuumsom destilacijom na temperaturi višoj od 350 °C i danas čini više od četiri petine od ukupno proizvedenih količina maziva. Maziva ulja mineralne osnove primjenjuju se za podmazivanje većine vozila i strojeva pri normalnim uvjetima rada. Za posebno teške uvjete rada (ekstremno visoke ili niske temperature), težu zapaljivost, dug vijek trajanja i slično primjenjuju se maziva koja sadrže sintetička bazna ulja (ugljkovodična, esterska, silikonska i drugo). Aditivima se može smanjiti ovisnost viskoznosti o temperaturi, poboljšati tečnost pri niskim i postojanost pri višim temperaturama, povećati sposobnost zaštite od korozije, te čvrstoća mazivoga sloja i time poboljšati podnošenje iznimno velikih tlakova, te smanjiti trošenje strojnih dijelova.

Glavno je svojstvo maziva viskoznost kao mjera njegova unutarnjeg trenja. Za podmazivanje uz veće brzine gibanja potrebna je manja viskoznost, a uz veća opterećenja veća viskoznost maziva. Viskoznost ovisi o temperaturi pa se s njezinim porastom smanjuje. Promjena viskoznosti s promjenom temperature označuje se indeksom viskoznosti (ulja većeg indeksa viskoznosti pokazuju manju promjenu viskoznosti s promjenom temperature). Mineralna bazna ulja imaju indeks viskoznosti

do približno 100, dok se dodatkom aditiva može postići i znatno viši indeks viskoznosti (do 200). Sintetička ulja mogu imati indeks viskoznosti i veći od 200.

Tekuća maziva svrstavaju se ponajprije u motorna ulja (maziva za vozila) i industrijska ulja (maziva za strojeve), a rabe se i marinska maziva za brodske motore i uređaje, maziva za željeznice, zrakoplove, poljoprivredne strojeve i drugo.

Motorna ulja čine približno polovicu ukupne proizvodnje svih maziva. Najviše se proizvode motorna ulja za benzinske i dieslove motore, a posebnu skupinu čine ulja za male motore motocikala, poljoprivrednih strojeva, lančanih pila te za izvanbrodske motore. Dvotaktni motori najčešće se podmazuju mješavinom motornog ulja i benzina. Motorna se ulja razvrstavaju prema viskoznosti na temelju takozvane klasifikacije SAE (prema eng. Society of Automotive Engineers). Za pokretanje motora pri niskim temperaturama viskoznost ulja određena je brojkama (manje brojke označuju i manju viskoznost) i slovom W (prema engl. Winter: zima), na primjer SAE 10W, dok se viskoznost potrebna za podmazivanje motora u radu označuje samo brojkama, na primjer SAE 30. U današnje se doba mnogo rabe višegradacijska ulja, koja su zbog male promjene svoje viskoznosti s promjenom temperature pogodna za primjenu i ljeti i zimi. Osim prema SAE, postoje i klasifikacije prema radnim svojstvima ulja za pojedine tipove i načine korištenja motora, na primjer u Europi prema specifikacijama Udruge proizvođača automobila ACEA (fr. Association des Constructeurs Européens d'Automobiles), a u Americi prema preporuci Američkog instituta za naftu API (eng. American Petroleum Institute).

Industrijska ulja za strojeve svojim su radnim svojstvima prilagođena vrsti stroja i mjestu primjene. Tako na primjer maziva za zupčanike smanjuju trošenje i oštećenja pri velikim pritiscima među zupcima, hidraulična ulja smanjuju trošenje dijelova crpki, razvodnih ventila i cilindara te štite od korozije, turbinskim se uljima podmazuju ležajevi turbina uz dobro odvajanje vode i dobru otpornost na starenje, ulja za kompresore otporna su na visoke temperature pri stlačivanju plinova i zaštita su od trošenja i stvaranja naslaga i taloga itd. Posebnu skupinu industrijskih maziva čine tekuća maziva za hlađenje i podmazivanje pri obradi metala. Viskoznost je glavni kriterij i za izbor industrijskih ulja, a ona se klasificiraju prema Međunarodnoj organizaciji za normizaciju (ISO), na primjer ISO VG 46 označuje ulje s kinematičkom viskoznošću 46 mm<sup>2</sup>/s (pri 40 °C).

Od čvrstih maziva najčešće se primjenjuju grafit i molibdenov disulfid, posebno za podmazivanje opterećenih kliznih površina kod manjih brzina. Mazive masti plastična su maziva kod kojih je sredstvom za zgušnjavanje bazno ulje dovedeno u stanje gela, pa u tom obliku služe za podmazivanje valjnih i kliznih ležajeva i drugih kliznih površina.

Podmazivanje, brtvljenje i hlađenje uljem moguće je osigurati na tri načina, već prema koncepciji motora;

- Zapluskivanjem maziva na kritična mjesta i površine;
- Dovođenjem ulja u ležajeve i na druga osjetljiva tarna mjesta pod tlakom;
- Dodavanjem ulja gorivu, kako se to npr. radi kod brzohodnih dvotaktnih motora malih snaga.

### Podmazivanje motora zapluskivanjem ulja

Dovod ulja u ležajeve i na ostale tarne površine zapluskivanjem maziva danas se za suvremene konstrukcije motora ne primjenjuje zbog visokih specifičnih opterećenja i nemogućnosti osiguravanja dovoljno otpornog sloja ulja unutar ležajeva, kao i zbog slabog protoka ulja koji omogućava hlađenje. U prijenosnih zupčanika i nekih drugih manje opterećenih elemenata unutar motora osigurava se i pri današnjim izvedbama dovoljno podmazivanje i hlađenje zapluskivanjem ulja, te raspršenim kapima unutar kućišta. Dno kartera služi gotovo kao rezervoar ulja.

### Podmazivanje motora pod tlakom

Dovod ulja pod tlakom pumpe u ležajeve kućišta, klipnjača i na ostala kritična mjesta, sproveden je na svim suvremenim konstrukcijama s visokom specifičnom snagom i velikim brojem okretaja, jer se klizni ležajevi nalaze na krajnjoj granici opterećenosti, kako u mehaničkom tako i u termičkom pogledu. Uljni sloj između ležajeva i rukavca vratila ne smije ni u jednom slučaju biti probijen pod utjecajem velikih tlakova izgaranja. Puštanje motora u pogon pri visokim, ali i vrlo niskim ambijentalnim temperaturama može dovesti do pojave polusuhog pa i suhog trenja na tarnim površinama, dakle i do oštećenja ležajeva i kliznih površina cilindara i klipova. Pri visokim ambijentalnim temperaturama ležajevi i cilindri motora na svojim su tarnim površinama obično suhi prilikom puštanja u rad, pa je potrebo određeno vrijeme dok pumpa "prihvati", dovede ulje do kliznih površina i dok se na njima formira dovoljno

otporan uljni klin. Pri vrlo niskim temperaturama gusto ulje teško prolazi kroz usisno sito, cijevi i ležajeve, pa je zakašnjenje u dovodu maziva vrlo veliko, a protok kroz ležajeve i odvod topline trenja malen. Visoki tlakovi na manometru za ulje u tom slučaju ne jamče da je sustav za podmazivanje normalno proradio i da se motor može opteretiti. U tom slučaju potreban je oprez, ukoliko ulje u kućištu motora nije bilo prethodno podgrijano.

### Podmazivanje dodavanjem maziva gorivu

Dvotaktni brzohodni motori male snage odlikuju se svojom jednostavnošću konstrukcije i niskom cijenom, pa se za njih ne predviđa poseban sustav podmazivanja već se mazivo jednostavno dodaje gorivu i to oko 2% do 5% uz dobro miješanje. U ovom slučaju riječ je redovito o motorima u kojih su primijenjeni valjni ležajevi. Ovaj način podmazivanja zahtijeva nešto povećane međuprostore između klipa i cilindra. Za neke tipove četverotaktnih automobilskih motora predviđa se tzv. "gornje podmazivanje" dodavanjem gorivu oko 2% do 4% maziva. Sličan se efekt postiže uvođenjem pare ulja iz kućišta u usisnu cijev motora. Tako se osigurava povoljniji mazivi sloj i zaštita površina gornjih dijelova cilindra, plašta i prstenova klipova te vodilica ventila.

## 2.1. Karakteristike motornih ulja

### 2.1.1. Viskoznost ulja

Viskoznost je veličina koja predstavlja mjeru unutrašnjeg otpora ili trenja koje se javlja u tekućini prilikom strujanja a predstavlja osnovnu karakteristiku ulja za podmazivanje. Izražava se u  $\text{mm}^2/\text{s}$ . Određuje se upotrebom viskozimetra po Stabingeru (ASTM D 7042). Viskoznost direktno utječe na formiranu debljinu sloja maziva, gubitke uslijed trenja i zagrijavanja. Od veličine viskoznosti, kod motora sa unutarnjim izgaranjem, ovisi mogućnost brtvljenja uljem, potrošnja ulja, mogućnost pokretanja motora pri niskim temperaturama itd.. Mazivo mora posjedovati odgovarajuće karakteristike, kako bi osiguralo adekvatno razdvajanje kontaktnih površina koje se podmazuju pri različitim radnim temperaturama. Izbor veličine viskoznosti ulja zavisi od više faktora kao što su: radna temperatura, ambijentalna temperatura, opterećenje, brzina pokretnih dijelova i drugi zahtjevi. U skladu sa time se u okviru iste kvalitete jedne grupe ulja, ona proizvode sa različitim veličinama viskoznosti. U praksi se fizikalno-kemijske karakteristike ulja određuju vrijednostima dinamičke viskoznosti ( $\eta$ ), kinematičke viskoznosti ( $\nu$ ) i indeksa viskoznosti (IV) koji predstavlja empirijski broj koji pokazuje tendenciju promjene viskoznosti sa promjenom temperature. Indeks viskoznosti (IV) je mjera otpora maziva usitnjavanju njegovih molekula sa porastom temperature, a predstavlja važnu karakteristiku maziva na nižim temperaturama. Tako npr. zbog pumpabilnosti maziva zahtijeva se njegova manja viskoznost, dok s druge strane zbog osiguravanja potrebne moći nošenja mazivnog filma na radnoj temperaturi, zahtijeva se njegova dovoljna gustoća. U slučaju motornih ulja, ispunjenju ovih zahtjeva uspješno pomažu poboljšivači indeksa viskoznosti bazirani na polimerima.

Uobičajeno se vrijednost indeksa viskoznosti kreće u granicama od 0 do 100. Pri tome  $IV = 0$  označava da je promjena veličine viskoznosti značajna, a  $IV = 100$  da su to ulja sa manje izraženom promjenom viskoznosti u zavisnosti od promjene temperature. Multigradna (višesezonska) motorna ulja i neke vrste sintetičkih ulja imaju indeks viskoznosti i veći od 100. Općenito, veći indeks viskoznosti označava manju tendenciju promjene viskoznosti sa promjenom temperature, i obrnuto.

Viskoznost ulja opada sa porastom temperature brzo i po određenoj zakonitosti i obrnuto sa padom temperature viskoznost raste. U toku eksploatacije poželjno je da promjena viskoznosti pri promjeni temperature bude što manja, jer ukoliko su tijekom rada temperaturni režimi promjenljivi i izazivaju velike promjene viskoznosti, mogu nastati poremećaji u funkcioniranju sustava, čija manifestacija je povećano trenje, trošenje i oštećenje. Tijekom rada i vremena, očekuje se porast viskoznosti maziva. Smanjenje viskoznosti se smatra opasnijim od njenog povećanja. Stoga je dozvoljena gornja granica +20% iznad nominalne vrijednosti, a donja – 10% ispod nominalne vrijednosti. Na slici 1. prikazano je da se u okviru iste kvalitete, ulje može proizvoditi sa različitim veličinama viskoznosti.

| Svojstva  | INA Super 5 |       |       | Metoda        |
|---|-------------|-------|-------|---------------|
|   | 15W-40      | 30    | 40    |               |
| Gustoća kod 15 °C, g/cm <sup>3</sup>                  | 0,885       | 0,890 | 0,895 | ASTM D 4052   |
| Kinematička viskoznost kod 100 °C, mm <sup>2</sup> /s | 14,5        | 11,2  | 14,5  | ASTM D 445    |
| Indeks viskoznosti                                    | 135         | 98    | 97    | ASTM D 2270   |
| Dinamička viskoznost (CCS), mPa·s/°C                  | 6 700 / -20 | —     | —     | ASTM D 5293   |
| Dinamička viskoznost (HTHS), mPa·s                    | 4,0         | 3,6   | 4,1   | CEC L-36-A-90 |

Slika 1. Ulje sa različitim veličinama viskoznosti

### 2.1.2. Gustoća ulja

Gustoća je odnos mase prema zapremini neke materije. Izražava se u kg/m<sup>3</sup>. Određuje se standardnim metodama (ASTM D4052, ASTM D7042, EN ISO 12185) koje koriste različite principe mjerenja a iz komercijalno-tehničkih razloga njene vrijednosti se daju na 15°C. Gustoća mineralnih ulja raste sa povećanjem molekulske mase a ovisno o prevladavajućem sadržaju određene vrste ugljikovodika. Do značajnog povećanja gustoće dovodi prisustvo sumpornih spojeva. Gustoća je bitna pomoćna karakteristika za određivanje strukture mineralnih ulja. Gustoća se jako malo mijenja sa promjenom tlaka ali jako značajno sa promjenom temperature. Bez značaja je u ocjeni kvalitete mazivih ulja.

### 2.1.3. Plamište ulja

Plamište mazivog ulja predstavlja onu temperaturu na kojoj pod utvrđenim uvjetima ispitivanja dolazi do prvog zapaljenja smjese uljne pare – zrak. Izražava se u °C. Plamište je kontrolna veličina. Pomoću plamišta se prepoznaje onečišćenje sa lakše isparljivim smjesama ugljikovodika (benzin, dizel gorivo i sl.). Kod korištenih ulja služi da se ustanovi eventualno razrijeđenje ulja sa gorivom.

### 2.1.4. Stinište ulja

Stinište je ona temperatura na kojoj se pri hlađenju mazivog ulja pod određenim uvjetima ispitivanja u određenom kratkom vremenskom rasponu više ne uočava tečenje. Izražava se u °C. Stinište ili temperatura na kojoj mazivo prestaje teći, vrlo je važno niskotemperaturno svojstvo maziva, koje također ovisi o kemijskom sastavu i strukturi ulja. Određuje se standardnom metodom kao npr. ASTM D 97 za određivanje stiništa naftnih proizvoda.

### 2.1.5. Sadržaj sulfatnog pepela

Na osnovu količine pepela procjenjuje se sadržaj anorganskih komponenti kao i spojeva metala (Ca, Mg, Zn, Ba i dr.). Kod određivanja sulfatnog pepela uzorak ulja se pažljivo zagrijava na 750°C uz dodatak sumporne kiseline. Određivanje sadržaja sulfatnog pepela pretežno služi za provjeru nivoa aditiranja. Sadržaj sulfatnog pepela mjeri se po metodama: ISO 3987; ASTM D 874; DIN 51768 i 51450.

### 2.1.6. Ukupni kiselinski broj (TAN)

Ukupni kiselinski broj je neutralizacijski broj namijenjen za mjerenje svih kiselinskih i kiselinsko-aktivnih materijala u mazivu uključujući jake i blage kiseline. To je titraciona metoda koja pokazuje relativnu kiselost maziva. Uzorak se razblažuje razrijeđivačem i alkalnom bazom, u obliku kalij hidroksida (KOH) i dodaje u kontroliranoj mjeri iz menzure dok se uzorak ne neutralizira. Kalij hidroksid je titrant. Neutralizacija se mjeri jedinicom volt ili pH faktorom. Točka početka neutralizacije se kreće oko vrijednosti faktora pH 11. TAN se određuje na osnovu utrošene količine KOH. Jake kiseline imaju tendenciju da postanu korozivne a njihova količina u mazivu mora se obavezno kontrolirati. Kiselinski broj koristi se kao pokazatelj oksidacijske degradacije ulja tijekom rada. Kada vrijednost TAN-a dosegne određeni



definirani nivo za određeno ulje i za njegovo mjesto primjene potrebno je izvršiti zamjenu ulja. Neočekivani porast vrijednosti TAN-a može ukazivati na abnormalne radne uvjete (npr. pregrijavanje) što zahtijeva traženje uzroka. Većina proizvođača maziva daje preporučene vrednosti TAN-a u katalogima. Ova analiza je posebno bitna za hidraulična, kompresorska, turbinska i druga ulja koja se koriste kod opreme osjetljive na koroziju. Dozvoljava se porast TAN za 50% od početne vrijednosti. Određivanjem ukupnog kiselinskog broja mjeri se porast kiselosti maziva u tijeku upotrebe. U toku primjene mazivo je često u kontaktu sa zrakom i na visokim temperaturama djelomično oksidira. Brzina oksidacije se smanjuje pogodnim antioksidantima. Kada se ulje degradira uglavnom oksidacijom, nusprodukti oksidacije su kiseli i daju kiselost ulju u usporedbi sa početnom vrijednosti, što povećava korozivnost. TAN je dobar indikator u pogledu pogodnosti ulja za daljnju upotrebu i obično se povećava pregrijavanjem ili kontaminacijom. Kod dizel motora, turbina i hidrauličnih sustava otpornost prema oksidaciji je vrlo bitna. Postepeno povećanje kiselinskog broja je uobičajena pojava, dok naglo povećanje ukazuje na vanjski izvor odnosno kontaminaciju. Ukupni kiselinski broj predstavlja količinu kalij hidroksida (KOH) potrebnu za neutralizaciju kiselina koje se nalaze u 1 gramu ulja. TAN se određuje metodom ASTM D 664.

#### 2.1.7. Ukupni bazni broj (TBN)

TBN je neutralizacijski broj namijenjen za mjerenje svih baznih (alkalnih) tvari u mazivu. Suprotno od TAN-a, ova metoda titracije služi za određivanje rezerve alkalnosti maziva. Generalno gledajući, TBN predstavlja pokazatelj sposobnosti ulja da neutralizira štetne kiselinske produkte nastale izgaranjem plinova u motoru. Uzorak se razblažuje razrjeđivačem i kiselinom (klorovodična) i dodaje u kontroliranoj mjeri iz menzure dok se uzorak ne neutralizira. Kiselina je titrant. Neutralizacija se mjeri na isti način kao i kod TAN-a, s tom razlikom da se točka početka neutralizacije najčešće javlja oko vrijednosti pH 4. TBN se određuje na osnovu utrošene količine kiseline. Vrijednost TBN-a je najveća kod novog nekorištenog ulja, a smanjuje se sa vremenom provedenim u radu. Niska vrijednost TBN-a ukazuje na skori kraj radnog vijeka ulja. Kiseline nastale izgaranjem (sumporna kiselina) smanjuju vrijednost TBN-a. Izgaranjem goriva u motoru i kondenzacijom formiraju se sulfitna ( $H_2SO_3$ ) i sumporna ( $H_2SO_4$ ) kiselina koje djeluju agresivno na metalne površine povećavajući

stupanj korozivnog djelovanja ulja. Da bi se one eliminirale, motornim uljima se za vrijeme procesa proizvodnje, dodaju aditivi koji mu daju bazna svojstva. Vremenom, bazna svojstva ulja slabe, pa se zato određuje ukupni bazni broj kao mjera istrošenosti aditiva. Značaj TBN-a očituje se u mogućnosti ocjenjivanja stupnja istrošenosti aditiva, koji se obavlja na osnovu razlike alkalnosti rabljenog i svježeg ulja. Određuje se metodama: ASTM D 2896 i 664; ISO 3771; IP 276 i 177; DIN EN 55. Ova analiza je bitna samo za motorna ulja i smatra se da ulje treba zamijeniti ako TBN padne za 50% od početne vrijednosti. Ukupan bazni broj označava alkalnu rezervu ulja koja treba neutralizirati kisele produkte sagorijevanja. Nagli pad TBN-a ukazuje na lošu kvalitetu goriva. Produljenje intervala upotrebe motornog ulja bez kontrole stanja je vrlo rizično i može imati slijedeće posljedice: sljepljivanje klipnih prstenova, izgorjele i lakom prekrivene klipove, brzo trošenje ležajeva, izgorjele ventile i konačno zaribavanje motora.

### 2.1.8. Klasifikacija ulja (SAE)

Udruženje automobilskih inženjera (Society of Automotive Engineers-SAE) uspostavilo je sustav numeričkih oznaka za klasifikaciju motornih ulja prema njihovoj viskoznosti. SAE gradacija uključuje redom oznake (od manje prema većoj viskoznosti): 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 i 60. Nakon brojeva 0, 5, 10, 15, 20, ili 25 stoji slovo "W", (Winter - zima) što označava viskoznost ulja na zimskim temperaturama. Što je broj veći, ulje je gušće. SAE klasifikacija pokazuje viskoznost ulja, ali ne određuje kvalitetu ulja. Na slici 2. prikazana su tipična fizikalno-kemijska svojstva ulja za podmazivanje.

#### Tipična fizikalno-kemijska svojstva

| Mobil Pegasus 710        |                   |                    |           |       |
|--------------------------|-------------------|--------------------|-----------|-------|
|                          | Jedinica          | Metoda ispitivanja |           |       |
| SAE gradacija            |                   |                    | 40        |       |
| Kinematička viskoznost,  | mm <sup>2</sup> s | ASTM D 445         | pri 40°C  | 121,0 |
|                          |                   |                    | pri 100°C | 13,2  |
| Indeks viskoznosti       |                   | ASTM D2270         | 98        |       |
| Tecište                  | °C                | ASTM D97           | -15       |       |
| Plamište                 | °C                | ASTM D92           | 249       |       |
| Gustoća, pri 15,6°C      | kg/m <sup>3</sup> | ASTM D4052         | 896       |       |
| Sadržaj sulfatnog pepela | % mas.            | ASTM D874          | 1,0       |       |
| Rezerve alkalnosti (TBN) | mgKOH/g           | ASTM D2896         | 6,5       |       |

Slika 2. Tipična fizikalno-kemijska svojstva ulja (Mobil Pegasus 710)

### 3. KONTAMINACIJA I DEGRADACIJA ULJA ZA PODMAZIVANJE

Činjenica je da ulje odmah po punjenju u sustav koji podmazuje postaje mehanički, termički i kemijski opterećeno i naprezano. To postepeno dovodi do promjene osnovne i prvobitne strukture ulja. Neophodno je istaknuti da su ova opterećenja sve snažnija, jer suvremeni agregati imaju sve manje zapremnine, radne temperature su sve više, a mehanička opterećenja ulja su sve veća. Zbog toga što su danas radni uvjeti za ulje sve teži, za novija konstruktivna rješenja, preporuke za interval zamjene ulja se više ne uklapaju i ne slažu sa prvobitnim. Postoje brojne mogućnosti za kontaminaciju ulja, a time i za njihovu degradaciju.

#### 3.1. Kontaminacija ulja prije upotrebe

Na relaciji od proizvođača do korisnika ulja, postoji niz mogućnosti za njegovu kontaminaciju i degradaciju, često i do stupnja neupotrebljivosti. Mogući kontaminanti su: benzin, dizel, neka druga ulja, voda, prašina i drugi atmosferski kontaminanti. Željezničkim cisternama i autocisternama prevoze se i goriva i maziva. Često se dešava da se prethodno transportirana roba ne istovari u potpunosti, pa će njome biti kontaminirana sljedeća roba. Nije rijedak slučaj da u cisterni zaostane i određena količina vode poslije pranja koja vrlo destruktivno utječe na ulje. Preventivne mjere su: stručna i redovna kontrola čistoće cisterne prije utovara i obavezna kontrola kvalitete ulja prije istovara (izgled, boja, miris, gustoća, sadržaj vode, točka paljenja, viskoznost). Prilikom pretakanja ulja iz cisterne u skladište kupca, postoji mogućnost za kontaminaciju ulja, ako je oprema za pretakanje zaprljana. U toku skladištenja, ako je filter na odušku rezervoara oštećen, kroz njega će ući prašina, pijesak ili slični abrazivni materijali. Zbog toga se filter mora često kontrolirati i po potrebi mijenjati. U skladišnim rezervoarima, u njihovom praznom prostoru, uvijek se sa zrakom nalazi i vlaga. Sa promjenom temperature, vlaga se kondenzira, slijeva se niz zidove i sakuplja se na dnu rezervoara. U kontaktu sa uljem kondenzirana voda može brzo i lako degradirati ulje i učiniti ga neupotrebljivim i prije upotrebe. Preventivnu mjeru predstavlja ugradnja grijača i održavanje temperature ulja do 40°C. Na toj temperaturi vlaga se neće kondenzirati. Međutim, i pored toga, nivo vode u rezervoarima treba redovno kontrolirati i po potrebi ih drenirati. Ako se bačve sa uljem skladište na otvorenom prostoru, u uspravnom položaju, može se dogoditi da

„usisaju“ vodu od kiše ili snijega. Sa promjenom temperature bačve „dišu“, u njima se stvara vakuum, što je uvjet za usisavanje vode ako se ona nalazi na poklopcu oko čepova. Preventivne mjere su: skladištenje bačava u zatvorenim skladištima ili u horizontalnom položaju, tako da poklopci budu na horizontalnoj osi. Prilikom istakanja ulja iz bačava u kante ili druge posude, koje su vrlo često „sumnjive“ čistoće, može doći do kontaminacije različitim zagađivačima. Prema tome, posude kao primitivan način distribucije ulja po radionici ili pogonima, treba zamjeniti suvremenim uređajima ili obavezno provjeravati njihovu čistoću. Na slici 3. prikazano je ispravno skladištenje bačava.



Slika 3. Ispravno skladištenje bačava (horizontalni položaj)

### 3.2. Kontaminacija ulja u toku upotrebe

Tokom upotrebe mijenjaju se tribološke osobine svih elemenata tribomehaničkog sustava. Čvrsti elementi trpe fizičke, a mazivo, fizičke i kemijske promjene. Brzina degradacijskih procesa i promjena na svim elementima sustava ovisi o ukupnim uvjetima pod kojima se odvijaju tribološki procesi u tribomehaničkom sustavu. Obzirom da su trenje i trošenje, dva glavna tribološka procesa, svih elemenata tribomehaničkog sustava (i maziva) uvjetovani istim okolnostima, postoji i može se utvrditi funkcionalna povezanost između njih i uvjeta rada. To je upravo faktor na kome se zasniva dijagnostika stanja maziva, a preko nje i dijagnostika stanja dijelova tehničkog sustava. Trošenje čvrstih elemenata sustava je polagani proces pa ga je teško pratiti, a osim toga teško je često zaustavljati sustav i otvarati ga zbog mjerenja

istrošenosti. Kontrola promjena ulja mnogo je lakša. Treba samo naći korelacije između promjena pojedinih elemenata. To se može izvesti praćenjem (eksperimentiranjem) na jednom karakterističnom sustavu. Za to je potrebno imati opremljeni laboratorij i stručno osposobljene djelatnike. Ulje, vršeći svoje funkcije u sklopu vozila, tokom eksploatacije postepeno mijenja svoje fizikalne i kemijske karakteristike. Uzroci promjena u ulju su fizikalno-kemijski i tribološki procesi u sustavu tokom eksploatacije, uvjeti pod kojima ulje obavlja svoju funkciju i uvjeti koji vladaju u okolini promatranog sustava.

Tokom eksploatacije uslijed djelovanja različitih čimbenika mehaničkog, fizikalnog i kemijskog karaktera odvijaju se procesi starenja, odnosno degradacije ulja kao sredstva za podmazivanje kod motornog vozila. Pri tome kod ulja dolazi do promjene njihovih fizikalno-kemijskih svojstava,

trošenja aditiva, narušavanja oksidacijske i termičke stabilnosti, te smanjenja sposobnosti nošenja uljnih slojeva. Te promjene vremenom dostižu kritičnu razinu sa stajališta pojedinih svojstava relevantnih za određeni sustav koji se podmazuje, što ima za posljedicu neprihvatljivost daljnje upotrebe ulja u sustavu.

Međutim, te promjene kod transmisijskih ulja nisu tako izražene kao što je slučaj sa motornim uljima, a i sama formulacija transmisijskih ulja je tako podešena da ona mogu vršiti svoje dobre funkcije u mnogo dužim vremenskim periodima.

Na promjenu svojstava ulja najveći utjecaj imaju:

- temperatura,
- tlakovi,
- brzine u sustavu podmazivanja,
- prisutnost vlage,
- prisutnost kisika iz zraka,
- čvrsti kontaminati i dr.

Vrsta, osobine i porijeklo kontaminanata ukazuju na prirodu i stupanj promjena.

Ljuskasti oblici metala npr. ukazuju na trošenje, dok zrnca različite veličine ukazuju na zamor materijala. Analiza kemijskog sastava metalnih čestica ukazuje na trošenje određenog elementa tribomehaničkog sustava.

U odnosu na dominantan mehanizam trošenja i uvjete ostvarivanja kontakta između elemenata sustava razlikuje se:

- adhezivno trošenje,
- abrazivno trošenje,
- trošenje uslijed površinskog zamora,
- erozivno trošenje,
- kavitaciono trošenje,
- vibraciono trošenje,
- trošenje kao posljedica oksidacije i
- trošenje uslijed procesa korozije.

Kontaminacija i degradacija ulja u eksploataciji ne mogu se potpuno spriječiti, ali se mogu znatno usporiti, što je izrazito važno i za ulje i za tehnički sustav. Brzina i stupanj degradacije ulja upravo su proporcionalni brzini i stupnju kontaminacije. Zbog toga je važno spriječiti brzu kontaminaciju ulja prije i u toku upotrebe. Spektar kontaminata ulja dosta je širok. Svaki kontaminant utječe destruktivno na ulje, umanjujući mu fizikalno-kemijske i radne osobine, a konačne posljedice su skraćanje vijeka ulja i sustava koji se podmazuje. Neispunjavanje bilo koje od brojnih funkcija ulja za podmazivanje, uslijed kontaminacije i degradacije, direktno se odražava na pojavu i intenzitet različitih mehanizama degradacije komponenti tehničkog sustava.

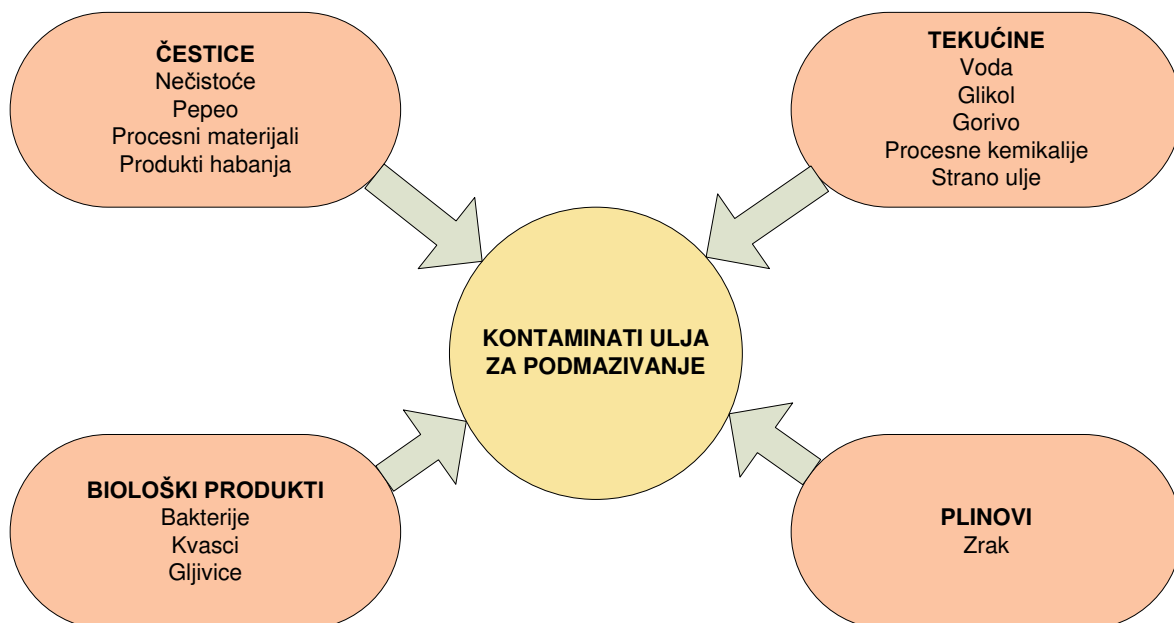
U skladu s tim:

- prisustvo vode u ulju za podmazivanje uzrokuje korozivne procese na kontaktnim površinama,
- prisustvo čvrstih kontaminata u ulju uzrokuje intenzivno abrazivno trošenje kontaktnih površina,
- promjena fizikalno-kemijskih karakteristika i razgradnja aditiva izazivaju gubitak osnovne funkcije ulja, koja se odnosi na razdvajanje direktnog kontakta površina radi smanjenja trenja i trošenja.

Dakle općenito, svi procesi koji narušavaju svojstva ulja tokom eksploatacije mogu se podijeliti u dvije grupe:

- degradaciju i
- kontaminaciju.

Degradacijski procesi predstavljaju sve procese uslijed kojih ulje za podmazivanje gubi mogućnost uspješnog obavljanja brojnih funkcija u sustavu. U tom slučaju i kontaminacija se promatra kao element degradacije. Tvari koje izazivaju kontaminaciju dopijevaju u ulje izvana ili se generiraju unutar sustava koji se podmazuje što ima za posljedicu skraćenje eksploatacijskog vijeka kako elemenata sustava, tako i samog ulja. Pored ovoga, pojedini oblici kontaminacije direktno pogoduju izazivanju degradacijskih procesa. Na slici 4. je prikazano prisustvo raznovrsnih kontaminata u ulju.



Slika 4. Kontaminati ulja za podmazivanje

Degradacija baznih ulja, bez obzira na činjenicu da li su mineralnog ili sintetičkog porijekla, odvija se u toku eksploatacije pod utjecajem:

- oksidacije,
- visokih temperatura i
- efekata zagrijavanja pod tlakom.

Degradaciju ulja ne izazivaju samo kemijske promjene u baznom ulju, već i proces progresivnog gubitka osnovnih (podmazujućih) svojstava ulja, jer je najveći broj aditiva koncipiran da se troši ili mijenja tokom eksploatacije kako bi se spriječili procesi trenja i trošenja. Osim toga, neki aditivi su osjetljivi na temperature, te dolazi do njihovog isparavanja ili uništavanja u uvjetima pri kojima ulje vrši funkciju na temperaturama iznad propisanih. Zagrijavanje, kontaminacija i gubitak svojstava aditiva može izazvati oštećenje samog baznog ulja. Gubitak efikasnosti aditiva ima za posljedicu gubitak mazivih svojstava ulja, prvenstveno aditiva koji inhibiraju neželjene pojave oksidacije korozije, aditiva koji štite kontaktne površine od trošenja i aditiva namijenjenih povećanju disperzivnosti. Posebnu pažnju prilikom izbora i zamjene ulja treba usmjeriti na period uhodavanja sklopova. U tim uvjetima, usljed prelaska tehnoloških u radne reljefne površine, nastaje intenzivno abrazivno i adhezivno trošenje, uz kontaminaciju ulja sitnim česticama abraziva.

Osnovna uloga maziva koja se manifestira spriječavanjem direktne interakcije površina u relativnom kretanju i neposredno učestće u kontaktnim procesima, daje mu poseban značaj sa stanovišta funkcioniranja, održavanja i dugoviječnosti elemenata i sustava kojima ti elementi pripadaju. Dakle, za vrijeme procesa eksploatacije dolazi do promjene radnih i triboloških osobina svih komponenti tehničkog sustava, pri čemu čvrsti elementi podnose fizičke, a mazivo i fizičke i kemijske promjene. Brzina i stupanj degradacijskih procesa ovise o radnim uvjetima (opterećenje, brzina elemenata u kretanju, temperatura i dr.). Činjenica da trenje i trošenje svih elemenata sklopova tehničkog sustava kao tribomehaničkih sustava nastaju pod istim okolnostima iskorišten je za uspostavljanje funkcionalne veze između radnih uvjeta i triboloških procesa. Upravo na ovoj činjenici bazira se dijagnostika stanja maziva, a na osnovu nje i dijagnostika svih elemenata pojedinih sklopova sustava.



U skladu sa prethodno spomenutim, promjene koje se javljaju u ulju mogu se podijeliti na:

- kemijske promjene u baznom ulju,
- fizikalno-kemijske promjene u aditivima i
- promjene u ulju uslijed pojave kontaminata.

Tablica 1. Pregled kontaminirajućih tvari sa osnovnim uzrocima kontaminacije i posljedicama

| <b>KONTAMINACIJA ULJA ZA PODMAZIVANJE</b> |   |   |
|---|---|---|
| <b>DEGRADACIJSKA POJAVA</b>               | <b>UZROK POJAVE</b>                                       | <b>POSLJEDICE</b>   |
| <b>Čvrstim materijalom</b>                |   |   |
| Prljavština                               | Okruženje   | Pospješuje trošenje, pogoršava svojstva maziva  |
| Metalni produkti trošenja                 | Odmakli stadij procesa trenja i trošenja u sustavu        | Smanjenje pouzdanosti i vijeka trajanja sustava koji se podmazuje, pojačana oksidacija ulja |
| Korozija                                  | Interakcija kisika, vode i željeza                        | Poboljšava trošenje   |
| Produkti karbonizacije                    | Pregrijavanje ulja  | Deponiranje u razvodima ulja i njihovo začepljenje  |
| Talog i naslage                           | Produkti oksidacije postaju nerastvorljivi                | Nastaju deponirani slojevi na kontaktnim elementima i kontrolnim ventilima                  |
| <b>Tekućinama</b>                         |   |   |
| Voda i procesni fluidi                    | Propuštanje zapornih elemenata i kondenzacija             | Smanjuje efikasnost podmazivanja i pospješuje propadanje maziva                             |
| Oksidacijski produkti                     | Iznimno visoke temperature i predug interval zamjene ulja | Stvaranje čvrstih kontaminata   |
| Druga sredstva za podmazivanje            | Od drugih nekompatibilnih ulja i masti                    | Može dovesti do promjene karakteristika maziva  |
| Dodaci mazivima                           | Eventualno se dodaje pri održavanju                       | Može dovesti do promjene karakteristika maziva  |
| <b>Plinovima</b>                          |   |   |
| Zrak                                      | Miješanje sa zrakom iz okruženja                          | Pjenjenje, aeracija, nepouzdan odziv sustava, kavitacija                                    |

## 4. OSNOVNI CILJEVI ANALIZE I MONITORINGA ULJA TIJEKOM EKSPLOATACIJE MOTORA

Osnovni ciljevi analize i monitoringa ulja tijekom eksploatacije motora su:

- analiza procesa trošenja elemenata sustava,
- analiza procesa kontaminacije maziva,
- praćenje promjena u svojstvima maziva radi optimizacije vijeka upotrebe i kontrole funkcionalnosti sustava (npr. prodor kontaminata, stanje temperature i tlaka, efikasnost uljnih filtera i dr.) i
- utvrđivanje stanja oštećenja i uzroka zastoja.

### 4.1. Analiza procesa trošenja

S obzirom na to da se radi o neizbježnom procesu rada sklopova i elemenata motora, trošenje kao složen fenomen predstavlja osnovni i najvažniji uzročnik pojave oštećenja i kvarova kod ovih sustava. Za dijagnostiku stanja motora ocjena početka intenzivnog trošenja je od bitnog značaja za prognoziranje težih oštećenja. Osim toga, istraživanjima je utvrđeno da se intenzivno trošenje karakterizira naglim porastom količine metala u ulju i porastom sadržaja produkata trošenja većih dimenzija, što predstavlja prvu indikaciju za oštećenje površina. U području normalnog trošenja čestice metala, produkti trošenja, su male po svojim dimenzijama i prirast količine je konstantan u toku jedinice vremena.

Vrsta trošenja se može procijeniti na osnovu karakterističnog oblika čestice. Tako se adhezivno trošenje pri normalnim uvjetima rada manifestira pločastim česticama malih dimenzija, dok su kod abrazivnog trošenja produkti slični strugotini pri obradi metala i mogu imati oblik spirale, uvijene žice i sl. Trošenje uslijed zamora materijala općenito, daje čestice loptastog oblika.

Pored toga, dimenzije čestica utvrđuju dijagnozu stanja podmazanosti dodirnih površina tako da čestice slijedećih dimenzija ukazuju na:

- < 5 µm – hidrodinamičko podmazivanje,
- < 15 µm – granično podmazivanje i
- < 150 µm – razaranje uljnog filma i pojava čvrstih adhezivnih mikrospojeva i
- < 1000 µm – izrazito veliko (havarijsko) trošenje.

Na osnovu prethodnih razmatranja slijedi da je za procjenu trošenja i prognoziranje mogućih oštećenja neophodno pratiti:

- *količina i vrsta metala u ulju*
- *oblik, koncentracija i distribucija čestica po veličini.*


Tablica 2. Dozvoljene količine elemenata u motornom ulju koje je uzorkovano

| Dozvoljene količine elemenata u motornom ulju koje je uzorkovano |             |  |
|--|-------------|--|
| Elementi   | mg/kg (ppm) | Porijeklo  |
| Fe   | 100         | Cilindri, klipovi, ležajevi, zupčanici, podizači ventila, bregasta osovina, koljenasto vratilo, osovine  |
| Al   | 20          | Klipovi, Al-Sn ležajevi, turbokompresor  |
| Ag   | 2-3         | Posrebrani dijelovi, ležajevi, osovinice   |
| Cr   | 30          | Kromirani dijelovi, klipovi, cilindri, podizači ventila, ispušni ventili, klipnjača  |
| Cu   | 40          | Cu-Pb ležajevi, čahure, hladnjak ulja, bregasta osovina, razvodni mehanizam (ventili sa sistemom za otvaranje i zatvaranje), brizgaljka, regulator |
| Pb   | 50          | Cu-Pb ležajevi, gorivo, aditivi  |
| Sn   | 25          | Dijelovi od bronce, ležajevi, klipovi  |
| B  | 20          | Antifriz   |
| Na   | 20          | Antifriz   |
| Ca   | 50          | Iz atmosfere   |
| Si   | 40          | Prašina iz atmosfere   |
| Zn, Mg, Mo   |             | Iz aditiva   |

Analiza sadržaja različitih metala prisutnih u mazivu je iznimno značajna. Čestice metala su abrazivne, a ponašaju se i kao katalizatori oksidacije ulja. U motornim uljima, porijeklo elemenata može biti iz aditiva, od trošenja, iz goriva, iz zraka i iz rashladnog medija. Metali iz aditiva mogu biti Zn, Ca, Ba, ili Mg i ukazuju na potrošenost aditiva. Metali koji potječu od trošenja su: Fe, Pb, Cu, Cr, Al, Mn, Ag, Sn i ukazuju na povećano trošenje u tim sklopovima. Elementi koji potječu iz rashladnog medija su Na i B, a povećani sadržaj ukazuje na prodor rashladnog medija u mazivo.

Povećani sadržaj Si ili Ca, koji potječu iz zraka, ukazuje na neispravnost filtera za zrak. Trošenje dijelova je glavni uzročnik neispravnosti u procesu eksploatacije mehaničkih sklopova. Karakteristično za trošenje je promjena oblika i dimenzija dijelova odnosno onih njegovih površina koje se međusobno dodiruju (radnih površina). Na slici 5. je prikazana analiza sadržaja različitih metala prisutnih u ulju Petro-Canada SENTRON LD5000.



| Make: WAUKESHA H24  |             | Model: C-250   |            | Serial No : MACHINE 5 |       | System: GAS ENGINE                 |           |           |         |      |     |    |                       |     |      |     |         |         |      |
|---|-------------|--|------------|-----------------------|-------|------------------------------------|-----------|-----------|---------|------|-----|----|-----------------------|-----|------|-----|---------|---------|------|
| Sample No: 4194688  |             | Job No.:   |            | Sampled: 27/09/12     |       | Received: 04/10/12                 |           |           |         |      |     |    |                       |     |      |     |         |         |      |
| Machine Hrs: 3500 HR  |             | Form No: AN116837664   |            | Oil Hours: 2500 HR    |       | Brand: PETRO CANADA SENTRON LD5000 |           |           |         |      |     |    |                       |     |      |     |         |         |      |
| <b>Diagnosis</b><br>Pour point=-24°C. High TAN. Wear appears satisfactory. Advice Resample at recommended sampling interval to follow trends. |             |  |            |                       |       |                                    |           |           |         |      |     |    |                       |     |      |     |         |         |      |
|   |             |  |            |                       |       |                                    |           |           |         |      |     |    |                       |     |      |     |         |         |      |
| An No.  | Sample Date | Oil Condition  |            |                       |       |                                    |           |           |         |      |     |    | Additive Elements ppm |     |      |     |         |         |      |
|   |             | Visc 40°C  | Visc 100°C | TBN                   | Water | TAN 177                            | Oxidation | Nitration | Init pH | Cl   |     |    | Top Up                | Ba  | Ca   | Mg  | P       | Zn      |      |
| 6   | 27/09/12    | 138  | 14.6       | 3.2                   | N     | 3.56                               | 18        | 14        | 5.7     | <100 |     |    | n/a                   | < 1 | 1998 | 6   | 294     | 405     |      |
| 5   | 03/09/12    | 135  | 14.4       | 3.3                   | N     | 3.41                               | 30        | 12        | 7.9     | <100 |     |    | n/a                   | < 1 | 1793 | 5   | 268     | 360     |      |
| 4   | 05/08/12    | 132  | 14.2       | 3.7                   | N     | 3.32                               | 25        | 11        | 4.9     | <100 |     |    | n/a                   | < 1 | 1893 | 5   | 269     | 363     |      |
| 3   | 12/07/12    | 127  | 13.9       | 4.1                   | N     | 2.46                               | 12        | 9         | 5.2     | <100 |     |    | 120                   | < 1 | 1977 | 5   | 266     | 368     |      |
| An No.  | Sample Date | Elemental Analysis - Contamination & Wear Metals ppm                                 |            |                       |       |                                    |           |           |         |      |     |    |                       |     |      |     | Oil Chg | Oil Age |      |
|   |             | B  | Na         | Si                    | Li    | Al                                 | Cr        | Cu        | Fe      | Pb   | Sn  | Mo | Ni                    | Ti  | Ag   | Mn  |         |         | V    |
| 6   | 27/09/12    | 4  | 3          | 3                     | 1     | 3                                  | 2         | 6         | 21      | 7    | 1   | 1  | < 1                   | < 1 | 2    | 1   | < 1     |         | 2500 |
| 5   | 03/09/12    | 2  | 4          | 3                     | < 1   | 1                                  | 2         | 5         | 18      | 4    | < 1 | 1  | < 1                   | < 1 | < 1  | < 1 | < 1     |         | 2000 |
| 4   | 05/08/12    | 3  | 3          | 2                     | < 1   | 2                                  | 1         | 4         | 16      | 2    | 2   | 1  | < 1                   | < 1 | 1    | 1   | < 1     |         | 1500 |
| 3   | 12/07/12    | 3  | 3          | 2                     | < 1   | 2                                  | 1         | 4         | 15      | 1    | 3   | 1  | < 1                   | < 1 | < 1  | 2   | < 1     |         | 1000 |

Slika 5. Analiza sadržaja različitih metala prisutnih u ulju

Zbog trenja dolazi do trošenja dodirnih površina što se odražava kroz povećanje zazora pokretnih spojenih dijelova i promjeni međusobnih odnosa, a to ima za posljedicu narušavanje propisanih međusobnih odnosa kako sklopova, tako i motora u cjelini. Promjena dimenzija i oblika dijelova u procesu eksploatacije tehničkih sustava, dovodi do preraspodjele postojećih opterećenja i povećanja kontaktnih pritisaka, pri čemu se javljaju sve jači dinamički udari na mjestima dodira, koji ubrzavaju trošenje dijelova. Uslijed dodatnih dinamičkih opterećenja dolazi do znatnijeg povećanja zazora što može uzrokovati i puknuće dijelova.

Pri realizaciji radnog ciklusa u cilindru motora oslobađa se određena količina topline koja se koristi za dobivanje mehaničkog rada. Sam proces transformacije kemijske energije goriva u toplinsku i toplinske energije u mehanički rad, praćen je povećanim mehaničkim i termičkim naprezanjem dijelova koji čine radni prostor motora (cilindri, klipovi, cilindarska glava, i dr.). Kod dizel motora maksimalna temperatura tijekom procesa sagorijevanja se kreće do 2000–2300°C dok kod otto motora i do 2500–2800°C.

#### 4.2. Analiza procesa kontaminacije ulja

Kontaminati predstavljaju destruktivne produkte dospjele u ulje izvana zbog neefikasnosti sustava pročišćavanja ili njegove kontaminiranosti. Kontaminati se također mogu pojaviti zbog fizikalno-kemijskih procesa koji se javljaju u ulju tijekom eksploatacije. Izrazito su destruktivni i negativno utječu na funkcionalnost elemenata sustava. Pravovremenim uočavanjem kontaminata, metodama monitoringa ulja mogu se prognozirati oštećenja i kvarovi komponenata sustava, što opet omogućava smanjenje destruktivnog djelovanja i visoki stupanj uštede izdvajanja sredstava za održavanje.

U motornom ulju prisutne su različite vrste kontaminata, kao što su:

- **čaća:** povećava viskoznost i gustoću, troši velike količine disperzanata, sa toplim talozima stvara koks, ponaša se abrazivno, dovodi do zaribavanja motora,
- „**topli talozi**“: povećavaju viskoznost i gustoću ulja, sa česticama čađe stvaraju koks, troše deterdžente i disperzante, pogoršavaju podmazivanje i dovode do zaribavanja motora,
- **nesagorjelo gorivo:** ispire uljni film sa površine radnih elemenata i smanjuje viskoznost ulja, snižava točku paljenja, pogoršava podmazivanje i brtvljenje motora, omogućuje veću protočnost plinova u karter, degradira ulje i dovodi do zaribavanja motora,
- **oksidacijski proizvodi goriva:** većina je kisela i korozivna; smanjuju baznu rezervu ulja (TBN) i ubrzavaju degradaciju,

- **sumporni i dušični oksidi (SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub>):** drastično smanjuju baznu rezervu ulja i izrazito su korozivni,
- **voda:** hidratizira neke aditive i degradira ih, stvara emulziju i pjenu, povećava viskoznost i gustoću ulja, brzo i potpuno degradira ulje i
- **metalne strugotine:** ponašaju se abrazivno, kataliziraju oksidaciju ulja. Zrnasti oblik metalnih strugotina ukazuje na zamor materijala, a ljuskasti na trošenje.

### 4.3. Praćenje promjena u svojstvima ulja

U toku eksploatacije, ulje za podmazivanje je izloženo brojnim promjenama koje utječu na režim eksploatacije i vijek tehničkog sustava. Međusobni efekti su povratni uslijed čega promjene kvalitete ulja utječu na uvjete eksploatacije. U pogledu analize ulja može se pokazati u kakvom se stanju nalaze dijelovi, odnosno:

- kakvi su uvjeti rada,
- vjerojatnost eventualnih oštećenja dijelova u uvjetima nenormalnog trošenja,
- da li je ulje koje se primjenjuje usklađeno sa uvjetima rada sustava, i
- da li je vrijeme dolijevanja i interval zamjene ulja prilagođen uvjetima rada, itd.

Analiza svojstava ulja koristi se radi utvrđivanja osnovnih karakteristika ulja za podmazivanje. Kontrolom ulja tijekom eksploatacije vrši se procjena nastalih promjena upotrebljavanog ulja u odnosu na referentnu veličinu za koju je određeno neupotrebljavano ulje. Analizom ulja se određuje optimalni interval zamjene i stanje elemenata sustava što direktno utječe na produljenje vijeka njegovih elemenata i ulja. Za analizu stanja ulja za podmazivanje koriste se standardne metodologije i uređaji i to najčešće za ispitivanje fizikalno-kemijskih karakteristika, a to su: viskoznost, plamište, stinište, ukupni bazni broj (TBN), ukupni kiselinski broj (TAN), sadržaj metala i dr. Destruktivne primjese u ulju, odnosno kontaminati, mogu biti uzrok zastoja elemenata tehničkog sustava. Usprkos poduzetim mjerama zaštite (brtvljenje) različiti kontaminati poput vlage, različiti kiseli produkti, kao i čvrsti kontaminati mogu se pojaviti u sklopovima sustava. Zato je potrebna njihova kontrola, primjenom standardnih metoda i procedura kako bi se neželjeni efekti izbjegli ili spriječili. Potreba za brзом i relativno točnom kontrolom ulja rezultirala je primjenom

ekspresnih (brzih) metoda. Međutim, treba napomenuti da se na ovaj način više prati utjecaj tehničkog sustava na ulje nego utjecaj ulja na sustav.

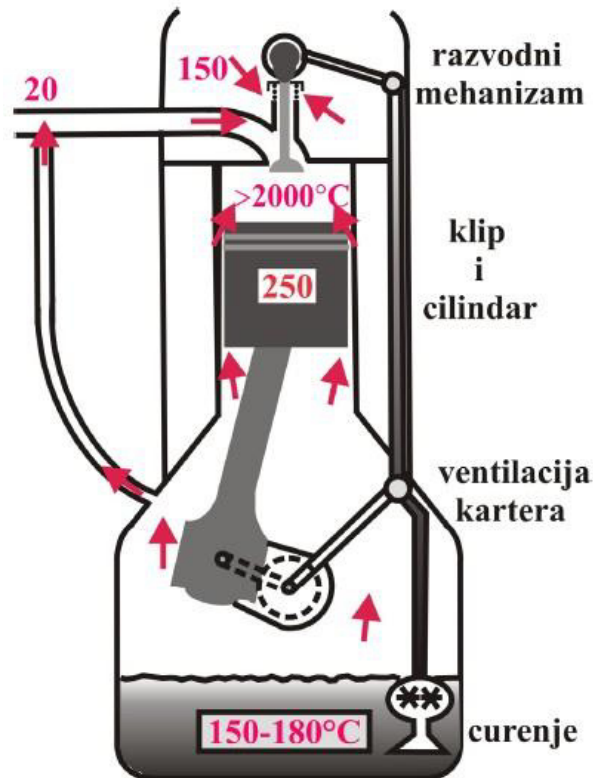
Tri su osnovna načina kojima se vrši analiza ulja:

- brze elementarne analize kojima se provjeravaju promjene u ulju,
- potpune kontrole, kao što je spektrometrija, filtracija i
- standardne analize i testovi.

Promjene stanja u ulju tijekom upotrebe, mogu biti registrirane sa nekoliko testova koji ukazuju na:

- količinu taloga u ulju,
- sposobnost ulja da razbije talog (važno kao pokazatelj efikasnosti i prisustva aditiva),
- razrjeđivanje ulja gorivom (motorna ulja),
- kemijske promjene u ulju, uzrokovane oksidacijom ili korozijom i
- stupanj istrošenosti raznih metalnih dijelova.

Intenzivna istrošenost dijelova motora praćena je gubitkom ulja, padom tlaka podmazivanja i prodorom plinova u karter. Na veličinu svakog od ovih pokazatelja i karakter njihove promjene u većoj ili manjoj mjeri utječe trošenje dijelova glavnog motornog mehanizma, tj. košuljice cilindra i klipne grupe. U očigledne, ali i među najteže mjerljive kriterije za gubitak pogonskih i upotrebnih karakteristika motora spada porast potrošnje ulja. U početnom periodu rada novog motora potrošnja ulja je povećana. Ulje uvijek dospijeva u cilindar i uvijek jednim dijelom sagorijeva i termički se razlaže na stijenkama košuljice cilindra. Tijekom eksploatacije, kako se uzajamno prilagođava rad dijelova, tako se i potrošnja ulja ustaljuje na jednu minimalnu vrijednost za taj tip motora i tu vrstu radnih uvjeta. Za današnje četverotaktne motore 95% potrošnje ulja je u sklopu klipna grupa-cilindar. Preostalih, manje od 5%, se troši kroz zazor ventila, kroz odušak kartera, na slabo zabrtvljenim mjestima i ako postoje u turbo-grupama. Unutrašnja cirkulacija ulja u motoru prikazana je na slici 6. Na slici su prikazane prosječne temperature u °C kako bi se prikazali radni uvjeti ulja.



Slika 6. Unutrašnja cirkulacija ulja u motoru

#### 4.4. Utvrđivanje uzroka oštećenja

U postupku analize uzroka oštećenja elemenata sklopova motora značajan doprinos daju i informacije dobivene analizom trošenja, ispitivanjem karakteristika ulja, zatim podaci o trenutnom tehničkom stanju sustava i potrošnja ulja. Postotak točnosti se povećava ako su ispitivanja ostvarena permanentno u određenom vremenskom intervalu, odnosno uspješnost dijagnostike sustava se povećava sveobuhvatnom analizom svih relevantnih faktora.

Efikasni program praćenja maziva sadrži tri osnovne kategorije ispitivanja a to su:

- ispitivanje svojstava fluida,
- ispitivanje sadržaja kontaminata i
- ispitivanje sadržaja, vrste, oblika i veličine produkata habanja.

Monitoringom ulja, odnosno analizom dobivenih rezultata na osnovu utvrđenih dijagnostičkih parametara, može se ocijeniti trenutno stanje i/ili prognozirati potencijalni problem pojedinog dijela motora, ili pak da se upotpuni zaključak i



pronađe razlog zbog kojega je došlo do oštećenja komponente motora. Tako, na primjer, pad viskoznosti i plamišta kao jedne od veličina dijagnostičkih parametara posljedica je prodora goriva u sistem ulja, što ukazuje na nepravilnosti u sistemu za napajanje ili na neadekvatne uvjete eksploatacije motora. Ocjena uspješnosti realizacije procedure analize ulja ovisi o njenoj formulaciji, odnosno definirane strategije, od njegovog učestalog i dosljednog provođenja, te na kraju stručne interpretacije dobivenih rezultata, što pruža mogućnost donošenja ispravnog tehnološko-ekonomskog zaključka.

Gore navedeno pokazuje da se opravdanost ulaganja financijskih sredstava u analizu ulja odražava u povećanju pouzdanosti i ekonomičnosti motora. To znači da uspješno i precizno implementirana procedura opravdava aktivnosti i uložena financijska sredstva. Procedura dijagnostike stanja ulja motora sa aspekta fizikalno-kemijskih i triboloških karakteristika sadrži niz neophodnih koraka od izbora sklopova, prikupljanja tehničkih podataka i informacija, tribološke analize stanja, izbora metoda ispitivanja uzoraka ulja, pa do obrade dobivenih informacija, interpretacije dobivenih rezultata i izvođenja zaključaka.

## 5. MONITORING STANJA KROZ TESTOVE ANALIZE ULJA

Postoji veliki broj različitih testova u okviru analize ulja koji se primjenjuju pri procjeni njegovog stanja. Testovi moraju pokriti tri područja interesa:

- stanje tehničkog sustava,
- stanje nečistoća u ulju i
- stanje ulja.

Sa aspekta stanja tehničkog sustava posebnu pažnju treba obratiti na pojavu i trend promjene broja čestica metala u ulju. Drugi fokus bi bilo stanje ulja, gdje je pažnju potrebno usmjeriti na promjenu viskoznosti, povećanje oksidacije i trošenja aditiva. Treći fokus bi bilo stanje nečistoća u ulju, gdje je potrebno pažnju usmjeriti na brojnost čestica, sadržaj vode i metalnih nečistoća. Teoretski, analize ulja podijeljene su u tri klase. U stvarnosti sve tri klase monitoringa stanja su međusobno povezane i moraju se gledati kao cjelina. Tako npr. povećanje viskoznosti može biti smjernica procesa oksidacije ulja. Međutim, to može biti pogrešan zaključak, ako nema pokazatelja trenda povećanja oksidacije dobivenih preko analize vrijednosti kiselinskog broja (TAN) i infracrvene analize na principu Furijerove transformacije (FTIR).

Vršeci monitoring stanja ulja, u mogućnosti smo izvršiti osvježenje ili zamjenu ulja prije nego što nastupe ozbiljnija oštećenja tehničkog sustava. Ako je oštećenje primjećeno u tijeku rada, zbog nečistoća u ulju ili problema vezanih za ulje, stanje tehničkog sustava se može kontrolirati i odmah izvršiti prekid njegovog rada u cilju smanjenja oštećenja. Postoje dva tipa alarma tj. upozorenja koja se koriste u analizi ulja: apsolutni i statistički alarm. Efikasna analiza ulja zasniva se na kombinaciji oba tipa. Granica upozorenja predstavlja apsolutni alarm. Statistički trend, uzima u obzir promjenljivost, koja je posljedica uzorkovanja ulja, zaprljanja ulja i sl., te predstavlja standardnu devijaciju (odstupanje). Odstupanje od ove normalne promjenljivosti signalizira pojavu ozbiljnijih problema. Ovo odstupanje predstavlja prvi znak za poduzimanje mjera u cilju rješavanja nastalog problema. Kako se trend odstupanja približava granici upozorenja potrebno je poduzeti mjere kao što je zamjena ili pročišćavanje ulja ili pregled tehničkog sustava.

Test može obuhvatiti kontrolu sadržaja čestica metala, kontrolu viskoznosti ili neke druge parametre. Područje normalne promjenljivosti uzima u obzir male varijacije nastale uslijed analitičke točnosti, homogenosti uzorka, itd. Uspostavljanje statističkih

alarma, koji osiguravaju najranije moguće upozorenje, bez lažnih alarma, je teško ostvariti. Faktori kao što su dodavanje ili zamjena ulja, zamjena filtera i tehnika uzorkovanja utječu na točnost rezultata.

Testovi koji su najčešće korišteni, prilikom monitoringa stanja tehničkog sustava, su:

- spektrometrijska analiza,
- analitička ferografija,
- infracrvena analiza (FT-IR),
- viskoznost,
- ukupni kiselinski broj (TAN),
- ukupni bazni broj (TBN),
- količina vode i čestica

## 5.1. Spektrometrijska analiza

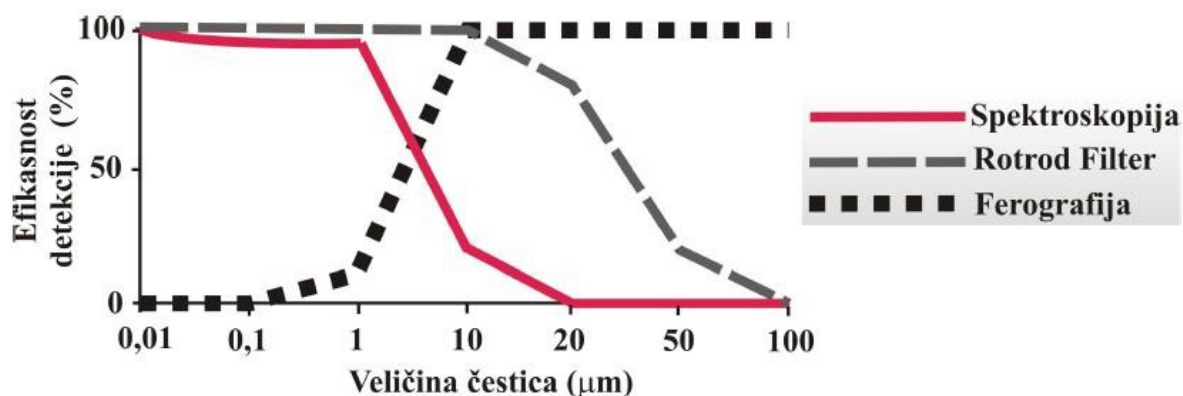
Posljednjih 40 godina ili približno toliko, spektrometrijska analiza se primjenjivala za analizu uzoraka korištenog ulja kao tehnika za monitoring stanja sustava (uvjeti režima monitoringa i prediktivnog održavanja koji se danas uobičajeno koristi). Spektrometrijska analiza određuje elementarnu koncentraciju raznovrsnih metala, kontaminata i aditive koji se pojavljuju u uzorcima korištenog ulja. Rezultati su obično izraženi u ppm. Komercijalne laboratorijske analize ulja daju podatke za oko 20 različitih elemenata.

Spektrometrijska analiza je tehnika za utvrđivanje i kvantificiranje metalnih čestica nastalih trošenjem, zaprljanjem i sl. Uzorak ulja se pobuđuje tako da svaki element emitira ili apsorbira određenu količinu energije što ukazuje na koncentraciju elemenata u ulju. Rezultati predstavljaju koncentraciju svih otopljenih metala i čestica. Oprema za spektrometrijsku analizu danas predstavlja standardnu opremu laboratorija za analizu ulja, a daje relativno brzu i točnu informaciju o stanju tehničkog sustava, onečišćenju i trošenju.

Tablica 3. Standardni elementi kod analize čestica trošenja motornog ulja

| Ispitani standardni elementi kod analize čestica trošenja |   |                               |  |                      |
|---|---|-------------------------------|--|----------------------|
| Kontaminat ili aditiv                                     | Metali  | Rashladno sredstvo ili aditiv | Aditivi ulja   | Kontaminat ili metal |
| Silicij (Si)  | Željezo (Fe)<br>Aluminij (Al)<br>Krom (Cr)<br>Bakar (Cu)<br>Olovo (Pb)<br>Kositar (Sn)<br>Nikal (Ni)<br>Srebro (Ag) | Natrij (Na)<br>Bor (B)        | Cink (Zn)<br>Fosfor (P)<br>Kalcij (Ca)<br>Magnezij (Mg)<br>Barij (Ba)<br>Molibden (Mo) | Vanadij (Va)         |

Nekoliko vrsta trošenja (trošenje kao posljedica raspadanja materijala pod utjecajem topline, klizna trošenja i režno trošenje) generira velike čestice koje se ne mogu otkriti spektroskopijom. Veličina čestice pri kojoj spektrometri počinju gubiti sposobnost detekcije zavisi od brojnih faktora kao što su vrsta i tip spektrometra. Gledajući generalno, spektrometri gube sposobnost detekcije čestica promjera od 1 do 10  $\mu\text{m}$  (Slika 5). Ovo je glavni nedostatak spektrometrijske analize. Na slici 7. je prikazana efikasnost detekcije spektrometrijskom analizom u odnosu na druge analize.



Slika 7. Efikasnost detekcije spektrometrijskom analizom

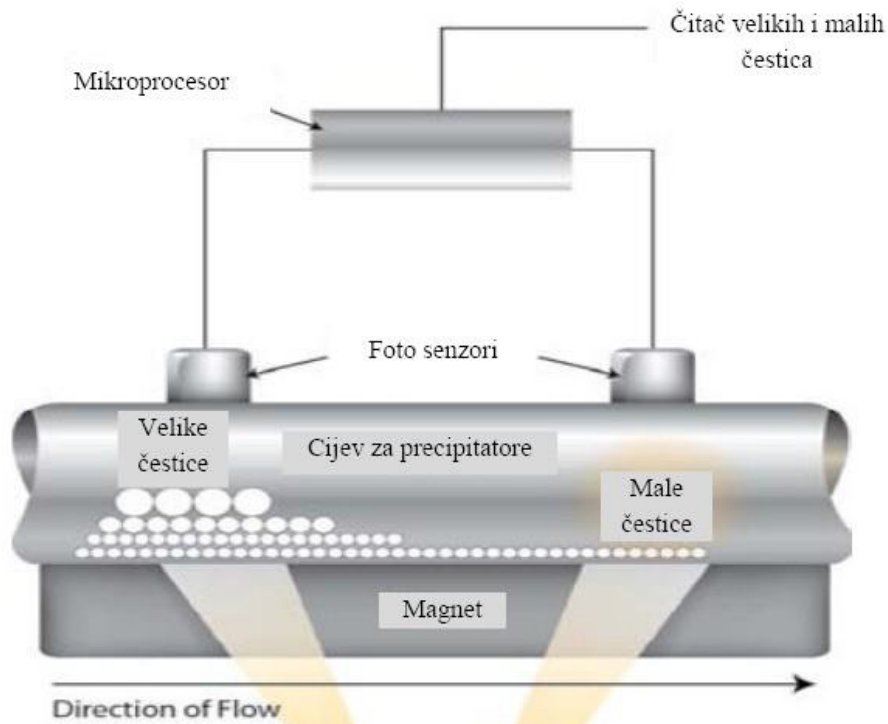
## 5.2. Analitička ferografija

Analitička ferografija je tehnika koja izdvaja istrošene magnetne čestice iz ulja. Ove čestice se sliježu na staklenoj površini poznatoj kao ferogram. Mikroskopsko ispitivanje omogućava da odredimo tip trošenja, a vjerojatno i izvor trošenja u tehničkom sustavu. Analitička ferografija je izuzetan indikator izrazito povećanog trošenja dijelova od nebojenih metala, ali je neprikladna u slučaju trošenja dijelova od obojenih metala. Test je od izuzetne koristi kod već uspostavljenog procesa trošenja. Rezultati uključuju izvještaj o veličini, morfologiji i količini čestica od nebojenih metala i nečistoća. Ferografija je dosta rasprostranjena tehnologija analize istrošenih čestica. Predstavlja dijagnostičko-prognozirajuću tehniku koja nudi pogodan način točnog procjenjivanja on-line stanja podmazivanih dijelova u kontaktu bez isključivanja tehničkog sustava.

Jedna automatizirana verzija ove tehnike je DR (Direct Read) ferografija koja mjeri odnos krupnih i sitnih čestica u ostacima uljnog uzorka. Mala količina uzorka se razrjeđuje razrjeđivačem i pušta da teče kroz malu kapilarnu cijev koja se kreće kroz magnetno polje. Dva optička senzora su nezavisno jedan od drugog postavljeni na ulaz i neznatno usmjereni niz kapilarnu cijev mjereći gustoću čestica nebojenih metala prikupljenih na oba mjesta. Ovi podaci se mogu koristiti pri određivanju koncentracije istrošenih čestica i indeksa ozbiljnosti situacije. Kada se sedamdesetih godina pojavio DR ferogram, doživio je veliki uspjeh, zahvaljujući sposobnosti da otkriva kako velike tako i male čestice nebojenih metala u ulju, kao i sposobnošću određivanja njihovog odnosa koji karakterizira pojavu povećanog trošenja kod sustava sa rotacijskim dijelovima.

DR ferografija je i dalje bazirana na magnetnom odvajanju, tako da se ovaj princip ne može koristiti u slučaju čestica od obojenih metala bilo koje veličine, kao i u slučaju anorganskih nemetalnih čestica (pijesak, nečistoće, i sl.). Ovaj nedostatak dolazi do izražaja posebno kod monitoringa opreme sa kritičnim dijelovima od obojenih metala. Zbog toga, tradicionalna spektroskopija, ostaje sastavni dio analize ulja upravo zbog sposobnosti da otkrije sitne čestice obojenih metala. Kombinacija DR ferografije i spektrometra je do pojave Rotrode Filter Spektroskopije (RFS) bila popularna metoda ekranizacije uljnih uzoraka radi detekcije povećanog trošenja. Međutim, čak i

u kombinaciji, ove metode ne mogu otkriti krupnije čestice obojenih metala. Na slici 8. je prikazan princip rada DR ferograma



Slika 8. Princip rada DR ferograma

### 5.3. Infracrvena analiza (FT-IR)

Infracrvena spektroskopija Fourierovom transformacijom (FT-IR) je spektrometrijska tehnika za detekciju organskih nečistoća, vode i produkata degradacije ulja u uzorku ulja. Vršiti se kontrola degradacije maziva (oksidacija, nitracija, sulfatacija, trošenje aditiva) i tekućih nečistoća (voda, glikol, razblaživanje maziva gorivom). Tijekom radnog vijeka maziva, akumuliraju se produkti oksidacije, prouzrokujući degradiranje ulja i u većini slučajeva lagani porast njegove kiselosti. Ako se oksidacija pojavi u većoj mjeri, mazivo će prouzrokovati koroziju kritičnih površina motora. Povećanje oksidacije dovodi do većeg „oksidacijskog broja“. Slično tome, „nitracijski broj“ ukazuje na nivo spajanja dušika u ulju prouzrokovanih vezivanjem atoma dušika (česta pojava kod motora na prirodni plin). Pojave kao što su bijeljenje ulja, taloženje mulja, ljepljivi klipni prsteni i začepljenje filtera javljaju se u sustavima sa problemom oksidacije i/ili nitracije. FT-IR spektroskopija također, utvrđuje kontaminaciju ulja vodom, glikolom antifrizom, naslagama čađi, razblaživanja ulja gorivom. Postoje preporuke proizvođača vezano za oksidacijske brojeve i tekuće nečistoće.

## 6. ANALIZA ULJA U PLINSKIM MOTORIMA WAUKESHA VGF H24GL

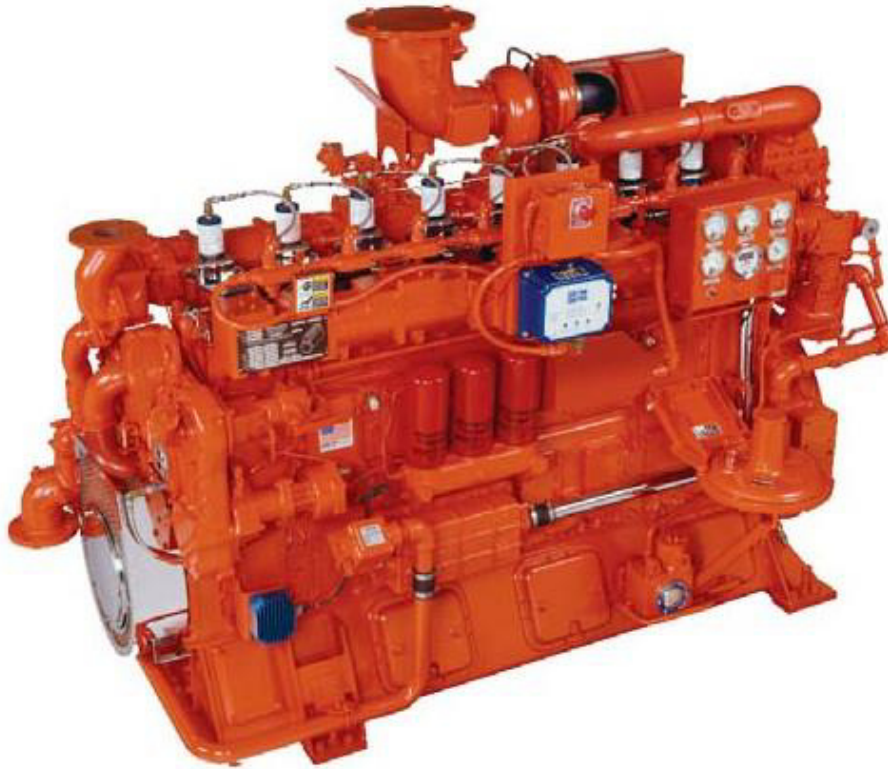
### 6.1. Tehnički opis kompresorske stanice sa instaliranim plinskim motorima Waukesha VGF H24GL

Kompresorska stanica je postrojenje sa pet kompresorskih jedinica tipa WA 530-4-3. Kompresorske jedinice namjenjene su za komprimiranje zemnog (kaptažnog) plina sa usisnog tlaka od 1,0 do 2,0 bara na istisni tlak od 35 do 51 bar, uz nazivni kapacitet od 62500 m<sup>3</sup>/dan.

Jedinice rade u funkciji proizvodnje nafte, metodom plinskog podizanja (gas-lift). Ova metoda zasniva se na utiskivanju plina u bušotine radi ostvarivanja potrebnih fizikalnih uvjeta za crpljenje nafte. Metoda podrazumijeva zatvoreni krug strujanja plina: kompresorska stanica – bušotine – separacija plina iz nafte – kompresorska stanica. Zbog prirode tehnološkog procesa, u ovom se krugu stalno ostvaruje višak kaptažnog plina koji je proporcionalan iscrpku nafte iz ležišta. Višak plina odvodi se u distribucijsku mrežu dok veći dio kruži u opisanom tehnološkom procesu. Zbog toga je predviđeno da tri jedinice rade u funkciji plinskog podizanja sa istisnim tlakom od 35 bar, a jedna jedinica u funkciji izravne dobave u distribucijsku mrežu sa istisnim tlakom od 51 bar. Kompresorska stanica ima jedan zajednički usisni kolektor i dva istisna kolektora, srednjetačni (35 bar) za plinsko podizanje i visokotlačni (51 bar) za izlaz u distribucijsku mrežu. Svaka kompresorska jedinica priključena je na oba istisna kolektora tako da može raditi u obje funkcije alternativno. Kompresorske jedinice WA530-4-3 su agregati sastavljeni od pogonskog motora Waukesha VGF H24 GL, stapnog kompresora Ariel JGJ 4-3 i zračnog hladnjaka za hlađenje vode plinskog motora i procesnog plina iza svakog stupnja kompresije, te pomoćnih uređaja. Navedena oprema instalirana je na zajedničkom čeličnom postolju (skidu).

#### Tehnički podaci plinskog motora WAUKESHA VGF H24GL:

- gorivo: suhi zemni plin
- radni ciklus: 4 takti
- broj cilindara: 8
- izvedba: in-line
- kompresijski omjer: 11:1
- snaga: 400 Kw
- broj okretaja: 1800 min<sup>-1</sup>
- težina: 3400 kg



Slika 9. Plinski motor Waukesha VGF H24GL

S obzirom da svaki konstruktor stroja i složenih sustava kao ideal ima savršeni mehanizam, tj. čovjeka, onda je i logično da se održavanje takve opreme željelo približiti i održavanju zdravlja kod čovjeka. Povučemo li paralelu između strojeva i čovjeka, medij koji bi odgovarao krvi kod čovjeka bilo bi ulje kod strojeva. Osim što ima svrhu podmazivanja i time smanjivanja trenja i trošenja, ulje tijekom svog cirkuliranja strojem odnosi i čestice trošenja.

Dakle, analiza ulja mogla bi se izjednačiti s krvnim pretragama kod čovjeka, najčešće prvim korakom u analizama zdravstvenog stanja čovjeka. Ako se želi održavati tehničke sustave tako, da imaju što manje zastoja i troškova koji slijede zbog otklanjanja zastoja i zbog toga što sustav ne obavlja svoju funkciju, onda tijekom cijelog rada sustava treba pratiti podatke koji govore o stanju ispravnosti opreme. Osobito je teško dobiti podatke o stanju opreme kod onih dijelova koji su nepristupačni za promatranje. U tim slučajevima analiza ulja omogućuje kontinuirano praćenje stanja opreme i djelovanje na vrijeme u cilju sprečavanja neželjenih dugotrajnih zastoja.



## 6.2. Opis analize ulja u plinskim motorima Waukesha VGF H24GL

Da bi se osigurao kontinuirani rad plinskih motora Waukesha VGF H24GL na kompresorskoj stanici, sa što manje zastoja i da bi se odredio optimalni interval zamjene ulja, u Službi istraživanja stijena i fluida ispituju se fizikalno-kemijska svojstva ulja za podmazivanje iz plinskih motora Waukesha VGF H24GL. Za ispitivanja fizikalno-kemijskih svojstava ulja za podmazivanje primjenjuje se nekoliko metoda i koristi se nekoliko instrumenata. Na slici 10. prikazan je Stabinger-viskozimetar SVM 3000 (Anton Paar).



Slika 10. Stabinger-viskozimetar SVM 3000 (Anton Paar)

Pomoću Stabinger-viskozimetra SVM 3000 određuju se kinematička viskoznost ulja pri 40°C i 100°C, indeks viskoznosti i gustoća ulja pri 15°C. Viskoznost je najvažnije svojstvo ulja. Viskoznost ulja definirana je kao otpor ulja prema protjecanju ili kao „čvrstoća“ ulja. Rabljenim uljima analizira se kinematička viskoznost (omjer dinamičke viskoznosti i gustoće ispitnog uzorka). Kinematička viskoznost izražava se u mjernim jedinicama  $\text{mm}^2/\text{s}$ . Dinamička viskoznost je omjer između primijenjenog smičnog napreznja i smične brzine tekućine (ispitnog uzorka). Indeks viskoznosti (VI) ukazuje na promjenu svojstava ulja s promjenom temperature, tj. s grijanjem ulja. Što je manja promjena svojstva ulja, to je indeks viskoznosti veći. Viskoznost ulja se

određuje pri temperaturama 40°C i 100°C, te instrument automatski iz vrijednosti tih mjerenja izračuna vrijednost indeksa viskoznosti.

Za većinu industrijskih mineralnih ulja uobičajena vrijednost indeksa viskoznosti je od 95 do 105. Mjerenjem viskoznosti prati se otpornost protoka na specifičnoj temperaturi. Smanjenje vrijednosti viskoznosti rabljenog ulja u odnosu na vrijednost viskoznosti novog ulja, može ukazati na zagađenje ulja s otapalom, gorivom ili uljem manje viskoznosti. Ukoliko se viskoznost povećala, znači da je došlo do oksidacije maziva ili do njegovog zagađenja. Rad sa Stabinger-viskozimetrom SVM 3000 vrlo je jednostavan. Pomoću šprice u instrument se umetne ispitni uzorak, na instrumentu se odabere željena metoda (ranije razvijena i unijeta u instrument), upišu se potrebni parametri, pokrene se mjerenje, te se za pet minuta ispišu rezultati. Na slici 11. je prikazan FT-IR analizator ulja, model 640 (Varian).



Slika 11. FT-IR analizator ulja, model 640 (Varian)

U Službi istraživanja stijena i fluida koristi se instrument FT-IR analizator ulja, model 640, proizvođača Varian. Njime se upravlja pomoću računalnih programa. Spektrofotometar ima nadograđenu pumpu za uvlačenje uzorka ulja u ćeliju spektrofotometra. Koristi se metodologija direktnog očitavanja. Pri razvoju metode u upravljački računalni program unijete su granične vrijednosti tako da se uz rezultate ispitivanja automatski ispiše i upozorenje, ukoliko izmjereni rezultati nisu prihvatljivih vrijednosti.

FT-IR analizatorom ulja određuje se zagađenje ulja čađom, gorivom, vodom i antifrizom, prati se prisutnost aditiva, te produkta razgradnje maziva pomoću određivanja oksidacije, nitracije i sulfatacije. Određuje se i bazni broj.

Oksidacija je mjera raspada maziva uslijed starenja i uvjeta rada, sprečava ispravno djelovanje aditiva, te utječe na povišenje sadržaja kiselina i vrijednosti viskoznosti. U svim sustavima s podmazivanjem, maziva, tj. organski spojevi, izloženi su visokim temperaturama i tlakovima koji uz prisutnost kisika oksidiraju. Pri tome nastaju razni spojevi poput estera, ketona, aldehida, karbonata i karboksilnih kiselina. Neke od tih spojeva otope sama ulja ili aditivi u uljima.

Nitracija je drugi oblik oksidacije i nastaje uslijed reakcije komponenti ulja s oksidima dušika ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  i  $\text{N}_2\text{O}_4$ ) koji su nastali oksidacijom atmosferskog dušika za vrijeme procesa sagorijevanja. Nitracija ukazuje i na prisutnost nitratne kiseline koja ubrzava oksidaciju. Porastom vrijednosti nitracije i oksidacije rastu vrijednosti viskoznosti i kiselinskog broja, a smanjuje se bazni broj. Osim što se nitracijom razrjeđuje ulje, produkti nitracije su glavni uzročnici razaranja površine mehanizma.

Kao produkti sagorijevanja nastaju i razni oksidi sumpora i vode čijom reakcijom nastaje sulfatna kiselina. Neutraliziraju je aditivi u ulju, pri čemu nastaju metalni sulfati. FT-IR metodologijom određuje se sulfatacija.

Prisutnost čađe ukazuje na smanjeno izgaranje. Nastanak čađe može biti uzrokovano smanjenjem dovoda zraka, prisutnošću previše goriva, predugim korištenjem stroja, neodgovarajućim tlakom ispuha i drugim. Prisutnost goriva u kućištu stroja smanjuje viskoznost ulja i njegovu kvalitetu. Ukoliko je prisutno, treba provjeriti je li došlo do kvara stroja. Stoga je potrebno analizirati i prisutnost goriva u ulju.

Ispituje se i prisutnost antifrizu u ulju. Ako ga ima, može se zaključiti da je došlo do izlivanja antifrizu što može rezultirati kvarom stroja. Bazni broj predstavlja ukupni alkalitet maziva i što je bazni broj veći, učinkovitija je zaštita od korozije. Bazni broj je mjera zaštite u mazivu koja je prisutna za neutralizaciju kiselina koje nastaju kao rezultat sagorijevanja ulja.

Postupak provedbe analize ulja pomoću instrumenta FT-IR analizator ulja, model 640, proizvođača Varian, s nadograđenom pumpom i pomoću odgovarajućih računalnih programa, je vrlo jednostavan. Prvo se na računalu spojenom s instrumentom pokrene računalni program „Resolution Pro Software, verzija 7.0.0.“ pomoću kojeg se provjeri stabilnost i ispravnost instrumenta, te se snime pozadinski

šumovi. Slijedi pokretanje računalnog programa „Oil Analyser Software, verzija 4.2.14.“ kojim se provjeri čistoća mjerne ćelije i ispravnost unutarnjeg umjeravanja. Ovisno o vrsti ispitnog ulja, odabere se odgovarajuća metoda. Sonda se uroni u ispitni uzorak, pokrene se metoda i pomoću pumpe se započne s uvlačenjem ispitnog uzorka u mjernu ćeliju. Za nekoliko sekundi, oglasi se zvučni signal, a na ekranu računala ispiše se potvrda o ispravno provedenom mjerenju. Mjerna ćelija se uz pomoć pumpe ispere otapalom. Nakon što se na ekranu ispiše da je mjerna ćelija čista, nastavlja se analiziranje drugih uzoraka ulja. Svi rezultati automatski se pohranjuju u posebnom folderu. Za svaki analizirani uzorak u njegovom izvještaju ispisani su rezultati za devet parametara: oksidacija, nitracija, sulfatacija, prisutnost čađe, goriva, vode, antifrizna i aditiva, te bazni broj. Ukoliko je neka izmjerena vrijednost izvan dozvoljenih granica, to je posebno istaknuto na izvještaju.

Osim baznog broja koji se određuje FT-IR analizatorom, u Službi istraživanja stijena i fluida određuje se i kiselinski broj. To je mjera sadržaja kiselih komponenti prisutnih u uzorku, a ukazuju na oksidaciju (izgaranje) maziva ili na njegovo zagađenje. Nagli porast kiselinskog broja može ukazati na zagađenje ili na vrlo oksidirano ulje, kao i na prisutan proces nitracije. Organske kiseline, koje nastaju u procesu oksidacije, mogu izazvati koroziju okolnog metala. Vrijednost kiselinskog broja određuje se titracijom otopine uzorka ulja i otapala s otopinom KOH (bazom), sve do neutralizacije prisutnih kiselina u ulju. Uz povećanje kiselinskog broja često se povećava i viskoznost ulja. Ukoliko je vrijednost kiselinskog broja rabljenog ulja dvostruko veća ili veća za 2,0 mg KOH/g od vrijednosti kiselinskog broja novog ulja, potrebna je zamjena rabljenog ulja i više se ne smije koristiti.

Nadalje, u uzorku ulja određuje se sadržaj vode, budući da prisutnost vode u većim koncentracijama može izazvati koroziju mehanizma. Također, prisutnost vode može utjecati i na viskoznost ulja. Voda može biti prisutna zbog kondenzacije (vjerojatno nastale prije dodavanja novog maziva) ili izlivanja antifrizna ili nekog procesnog fluida. Treba se voditi računa i o skladištenju ulja kako voda ne bi dospjela u spremnike s uljem. Prisutnost vode u spremniku može poticati nastajanje korozije uslijed prisutnosti mikrobioloških organizama. Oni dodatno stvaraju i naslage koje mogu uzrokovati razna neželjena začepjenja filtera i opreme. Osim navedenog, prisutnost vode može utjecati na razgradnju maziva i na slabo podmazivanje. Voda je najčešći zagađivač ulja za podmazivanje.

Ulju za podmazivanje određuju se stinište (točka tečenja) i plamište (točka paljenja). Stinište (točka tečenja) je najniža temperatura na kojoj uzorak ne teče. Važno ju je odrediti zbog samog skladištenja ulja u zimskim mjesecima i zbog pokretanja plinskih motora za vrijeme niskih ambijentalnih temperatura.. Plamište, tj. točka paljenja ulja, definirana je kao najniža temperatura kod koje dolazi do zapaljenja ulja. Plamište se prvenstveno određuje kako bi se potvrdilo da nije prisutno zagađenje, najčešće hlapljivim gorivima poput benzina. Vrijednost plamišta rabljenog ulja ne bi smjela biti niža od 20 °C u odnosu na vrijednost plamišta novog ulja. Do snižavanja vrijednosti plamišta može doći zbog zagađenja ulja drugim uljem ili aditivom.

Tablica 4. Ispitivanja fizikalno-kemijskih svojstava ulja za podmazivanje

| Značajka kvalitete               | Metoda  | Instrument   |
|----------------------------------|---|--|
| Kinematička viskoznost pri 40°C  | ASTM D7042<br>(Automatizirana metoda)                     | Stabinger-viskozimetar<br>SVM 3000 (Anton Paar)  |
| Kinematička viskoznost pri 100°C |   |  |
| Indeks viskoznosti (VI)          |   |  |
| Gustoća pri 15 °C                |   |  |
| Oksidacija                       | ASTM E2412<br>(FT-IR spektrofotometrija)                  | FT-IR analizator ulja,<br>model 640 (Varian),<br>s nadograđenom pumpom<br>Masterflex L/S<br>Easy-load II Pump Heads,<br>model 77200-50 (Cole-<br>Parmer) |
| Nitracija                        |   |  |
| Sulfatacija                      |   |  |
| Prisutnost čađe                  |   |  |
| Prisutnost goriva                |   |  |
| Prisutnost vode                  |   |  |
| Prisutnost antifrizna            |   |  |
| Prisutnost aditiva               |   |  |
| Bazni broj                       |   |  |
| Kiselinski broj                  | ASTM D664<br>(Potenciometrijska titracija)                | 808 Titrandu<br>(Metrohm)  |
| Sadržaj vode                     | ASTM D6304<br>(Karl-Fischerova titracija,<br>sa sušnicom) | Karl Fischer Coulometer<br>DL39<br>(Mettler Toledo)  |
| Stinište (točka tečenja)         | ASTM D97  | Temperaturna komora<br>(INKO)  |
| Plamište (točka paljenja)        | ASTM D92  | HFP 370 Cleveland<br>(Herzog)  |

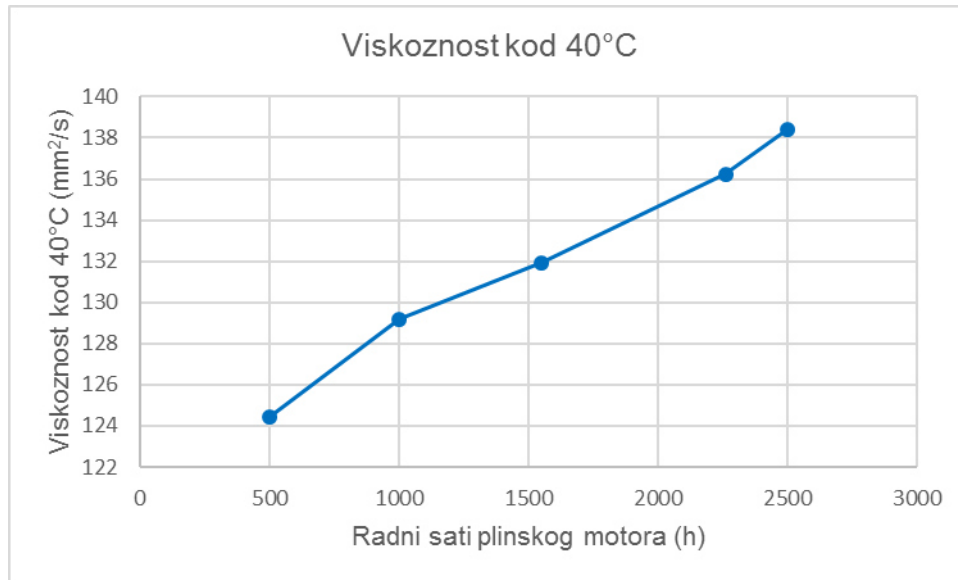
### 6.3. Rezultati praćenja fizikalno-kemijskih svojstava ulja iz motora Waukesha VGF H24GL

U Službi istraživanja stijena i fluida provode se analize praćenja fizikalno-kemijskih svojstava rabljenih ulja. Analiziraju se i nova ulja, te se uspoređuju vrijednosti odabranih značajki kvalitete rabljenog ulja s istim značajkama kvalitete novih ulja. Također se vodi računa o graničnim vrijednostima. Za provedbu analize potrebno je 250 mL uzorka ulja, prikupljenog u čisti i suhi spremnik. Potrebni su i podaci o nazivu ulja, lokaciji uzorkovanja, datumu uzorkovanja i podatak o radnim satima mehanizma koji je podmazivan uljem. Osim rabljenog ulja, za analizu je potrebno i novo ulje s čijim vrijednostima značajki kvalitete će se usporediti vrijednosti značajki kvalitete rabljenog ulja. Ukoliko se više puta analizira rabljeno ulje s iste lokacije, tada se uspoređuju i rezultati (vrijednosti značajke kvalitete) i rabljenih ulja, uzorkovanih različitih datuma i radnih sati.

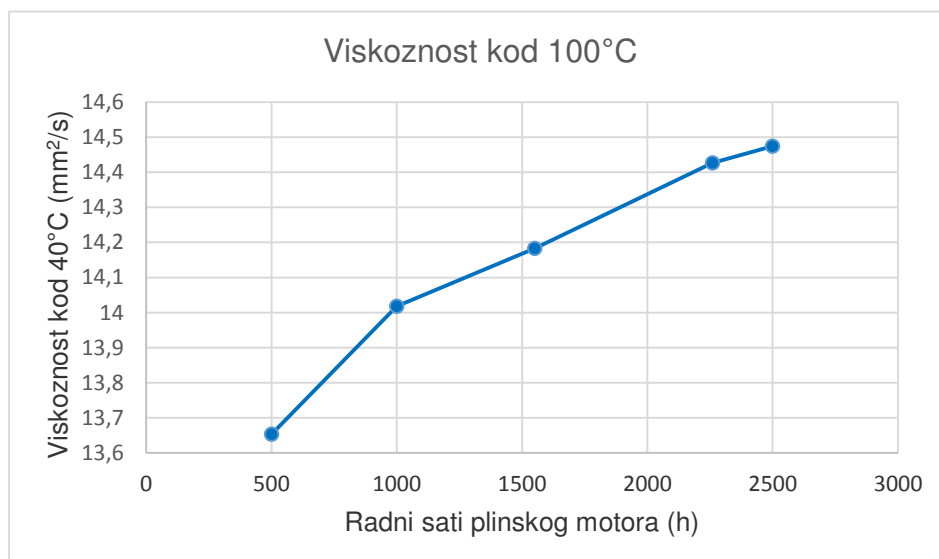
U Službi upravljanja održavanjem donesena je odluka da će se ulje Petro-Canada SENTRON LD5000 analizirati svakih 500 radnih sati. Analizirano je rabljeno ulje iz plinskog motora tehnološke oznake C-250. Odmah nakon zaprimanja navedenog ulja u skladište, izuzet je uzorak i provedena je analiza i novoga ulja.

## VISKOZNOST ULJA

Sa porastom broja radnih sati plinskog motora, došlo je do porasta viskoznosti kod 40°C i 100°C. Uobičajeno je da tijekom rada i proteklog vremena, viskoznosti ulja raste.



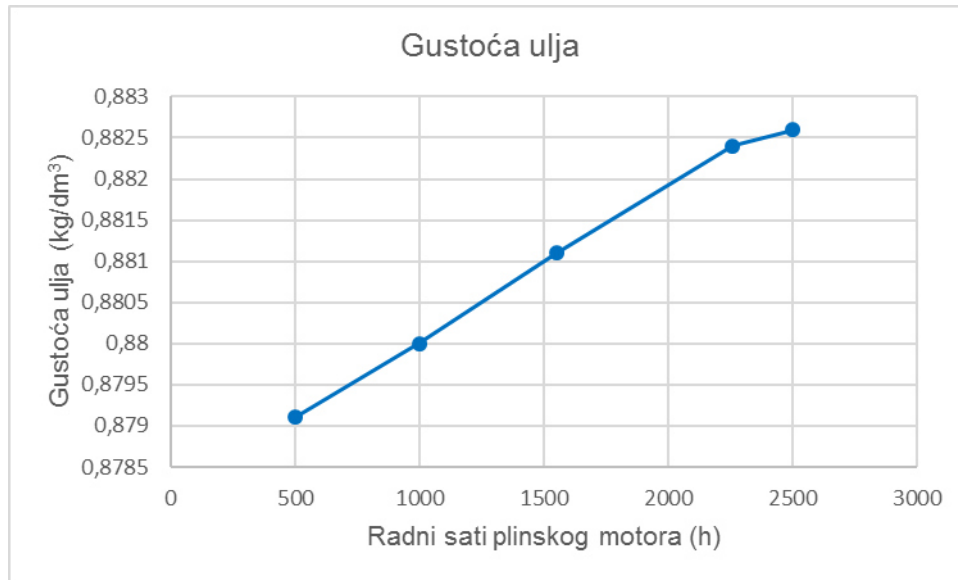
Slika 12. Prikaz promjene viskoznosti kod 40°C u odnosu na radne sate plinskog motora



Slika 13. Prikaz promjene viskoznosti kod 100°C u odnosu na radne sate plinskog motora

## GUSTOĆA ULJA

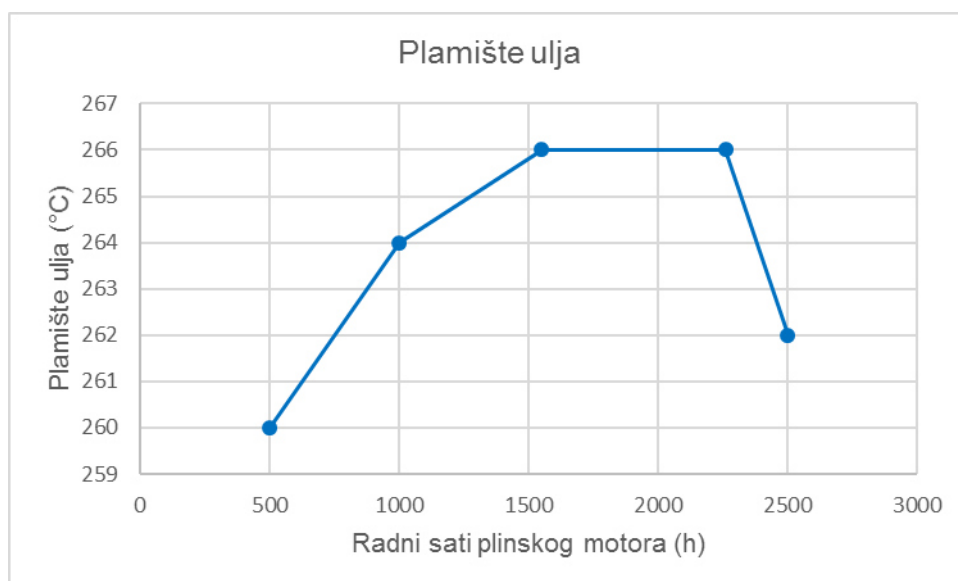
Gustoća ulja se povećala sa brojem radnih sati plinskog motora. Do povećanja gustoće je došlo uslijed prisutnosti sumpornih spojeva u ulju.



Slika 14. Prikaz promjene gustoće ulja u odnosu na radne sate plinskog motora

## PLAMIŠTE ULJA

Tijekom eksploatacije ulja došlo je do porasta pa nakon toga do pada vrijednosti plamišta ulja. Analiza je pokazala da nije došlo do prodora rashladnog medija u ulje odnosno do onečišćenja.

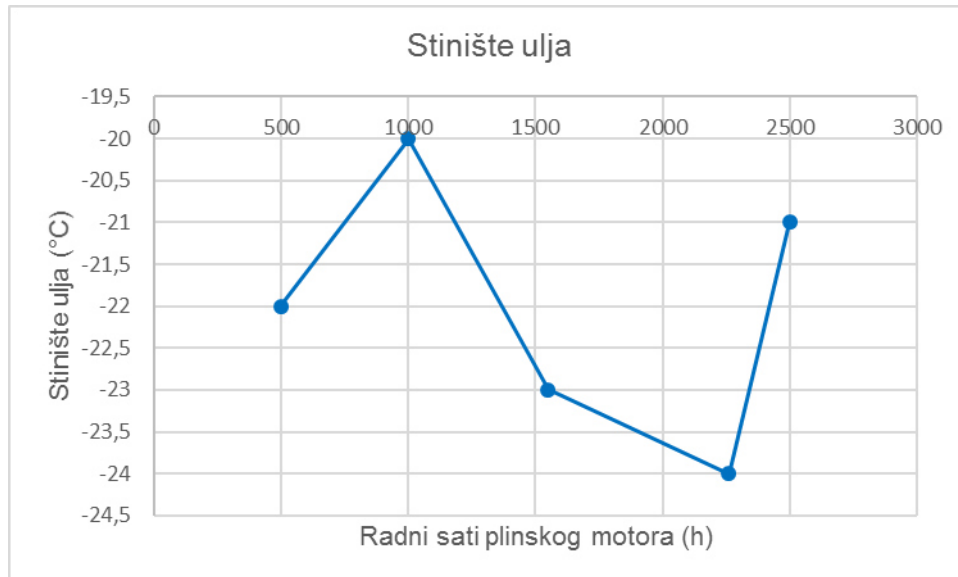


Slika 15. Prikaz promjene plamišta ulja u odnosu na radne sate plinskog motora



## STINIŠTE ULJA

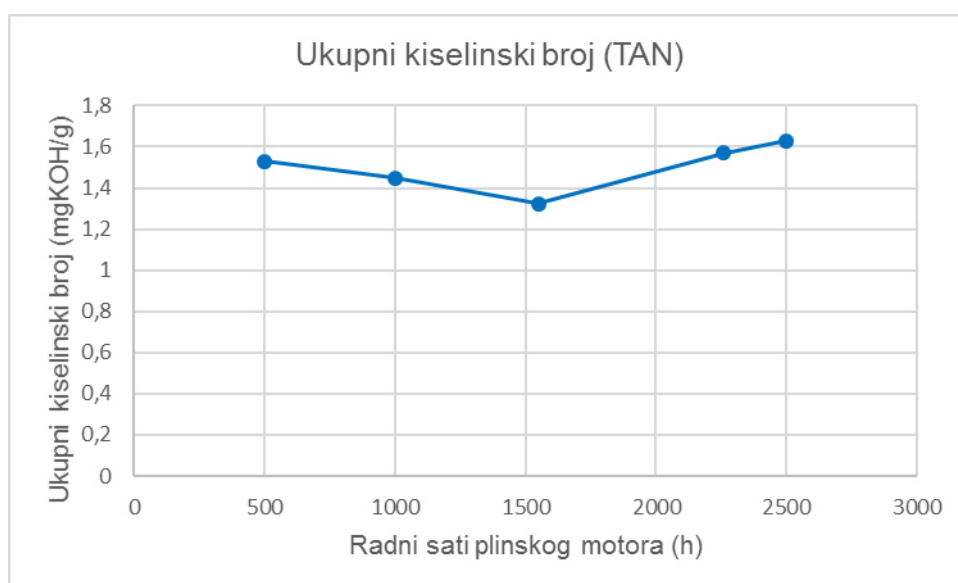
Nakon odrađenih 2500 radnih sati, stinište je ostalo na približno istoj razini, odnosno nije došlo do značajne promjene vrijednosti.



Slika 16. Prikaz promjene stiništa ulja u odnosu na radne sate plinskog motora

## UKUPNI KISELINSKI BROJ (TAN)

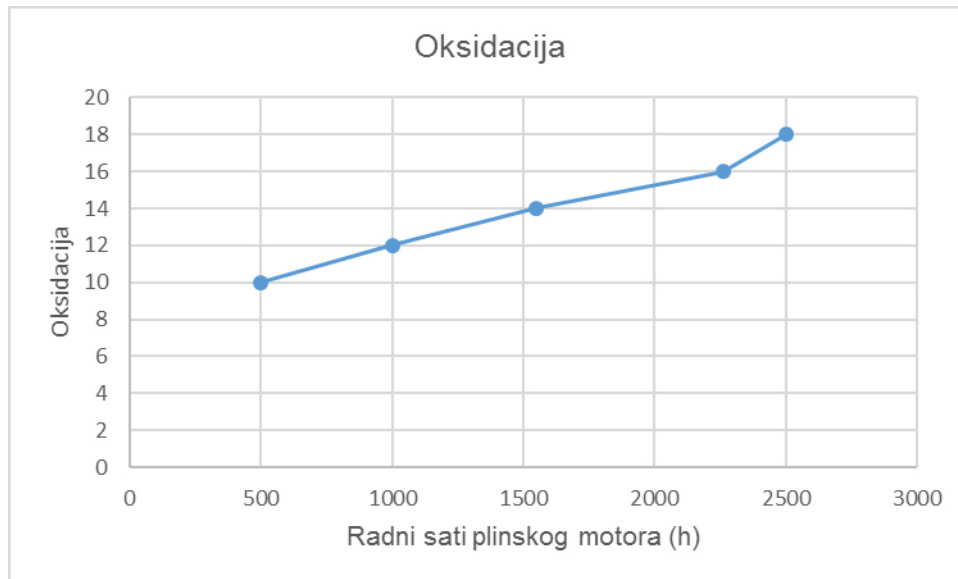
Došlo je do povećanja ukupnog kiselinskog broja (TAN), što znači da je došlo do porasta kiselosti maziva u tijeku eksploatacije.



Slika 17. Prikaz promjene TAN-a u odnosu na radne sate plinskog motora

## OKSIDACIJA

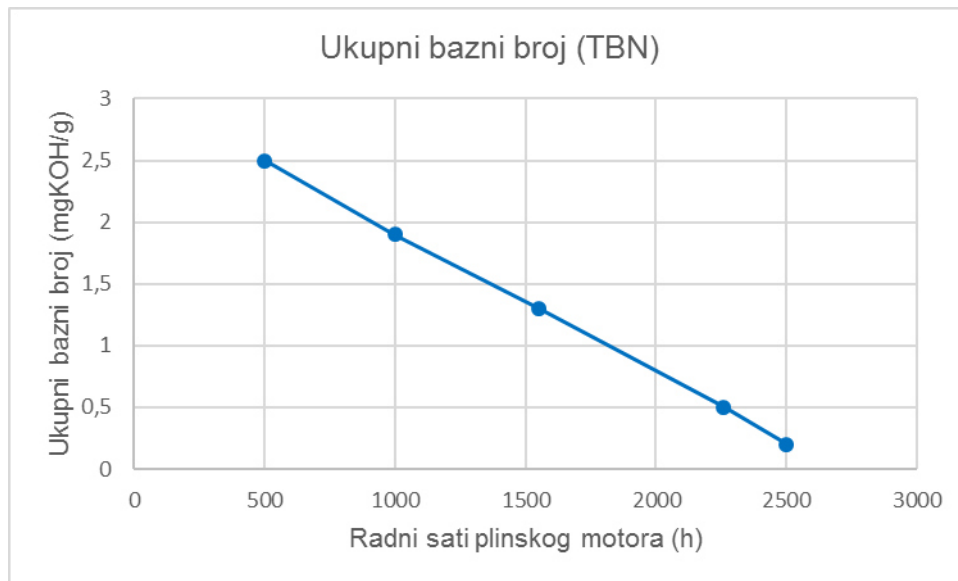
Sa povećanjem broja radnih sati plinskog motora, povećala se i oksidacija. Ulje u motoru je izloženo visokim temperaturama a pri takvim uvjetima dolazi do tzv. starenja ulja. Temperatura je najpoznatiji akcelerator procesa oksidacije, pa se njezin utjecaj može kvantitativno izraziti, tako da brzina oksidacije postaje približno dvostruka, ako se temperatura poveća za 10°C.



Slika 18. Prikaz promjene oksidacije ulja u odnosu na radne sate plinskog motora

## UKUPNI BAZNI BROJ (TBN)

Nakon 2500 radnih sati došlo je do smanjenja vrijednosti TBN-a sa početnih 2.5 mgKOH/g na 0.2 mgKOH/g. Vrijednost TBN-a je najveća kod novog nekorištenog ulja, a smanjuje se sa vremenom provedenim u radu. Niska vrijednost TBN-a ukazuje na skori kraj radnog vijeka ulja. Kiseline nastale izgaranjem (sumporna kiselina) smanjuju vrijednost TBN-a. Izgaranjem goriva u motoru i kondenzacijom formiraju se sulfitna ( $H_2SO_3$ ) i sumporna ( $H_2SO_4$ ) kiselina koje djeluju agresivno na metalne površine povećavajući stupanj korozivnog djelovanja ulja.



Slika 19. Prikaz promjene TBN-a u odnosu na radne sate plinskog motora

Nakon provedenih opsežnih analiza, odlučeno je da interval zamjene ulja u plinskim motorima Waukesha VGF H24GL iznosi 2500 radnih sati. Nakon 2500 radnih sati došlo je do značajnog povećanja viskoznosti, do povećanja oksidacije i značajnog smanjenja ukupnog baznog broja (TBN). Smanjenjem ukupnog baznog broja (TBN), ulje je izgubilo sposobnost da neutralizira štetne kiselinske produkte nastale izgaranjem plinova u motoru.

Služba istraživanja stijena i fluida akreditirana je od strane Hrvatske akreditacijske agencije za područje ispitivanja odabranih značajki kvalitete stijena, prirodnog plina, kondenzata, nafte, slojne vode, naftnih i procesnih fluida, slijedom zahtjeva norme HRN EN ISO/IEC 17025 „Opći zahtjevi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija“. Akreditirane su 24 metode, od kojih se za analizu ulja primjenjuju metode za određivanje kinematičke viskoznosti, indeksa viskoznosti, gustoće, sadržaja vode, stiništa i plamišta. Akreditacija je potvrđivanje koje provodi treća strana (npr. Hrvatska akreditacijska agencija), a odnosi se na tijela za ocjenjivanje sukladnosti, dajući formalni iskaz njegove osposobljenosti za obavljanje određenih zadataka ocjenjivanja sukladnosti. Nadalje, akreditacija jamči podizanje razine organizacijske i tehničke osposobljenosti laboratorija, daje povjerenje u sigurnost i kvalitetu proizvoda i usluga. Ispitni laboratoriji se akreditiraju jer provode mjerenja i ispitivanja određivanja danih svojstava i utvrđuju sigurnost industrijskih proizvoda.

Akreditacija više metoda primjenjivanih u istom laboratoriju ukazuje da taj laboratorij osigurava kvalitetnu provedbu svih ispitivanja (ne samo akreditiranih) s pouzdanim i valjanim rezultatima ispitivanja. Stoga se može zaključiti da se i neakreditirane metode u tom laboratoriju provode kvalitetno i kompetentno.

Pouzdanost ispitnih rezultata dobivenih primjenjivanim metodama za analizu rabljenih ulja osigurava se i sudjelovanjem u programu međulaboratorijske usporedbe (ASTM Proficiency Testing - Committee D02) u kojemu se tri puta godišnje analiziraju uzorci rabljenog loživog ulja. Također, ispravnost instrumenta se provjerava dnevno, tjedno ili mjesečno (ovisno o primijenjenoj metodi i instrumentu) analiziranjem certificiranog referencijskog materijala (CRM) ili radnog standarda. Ovlašteni serviser provodi redovni servis i validaciju instrumenata jednom u razdoblju od dvije godine.

Na slici 20. i 21. prikazane su analize ulja Petro-Canada SENTRON LD5000 koje su provedene u Službi istraživanja stijena i fluida.

## REZULTATI

Uzorak: Ulje Petro-Canada SENTRON LD 5000 iz plinskog motora C-250

Tablica 1: Fizikalno-kemijska svojstva ulja za podmazivanje

| Ev. broj i naziv uzorka:                               | 688<br>C-250<br>Ulje motora nakon 500h<br>Uzorkovano: 19.06.12. | 768<br>C-250<br>Ulje motora nakon 1000h<br>Uzorkovano: 12.07.12. | 841<br>C-250<br>Ulje motora nakon 1550h<br>Uzorkovano: 02.08.12. | 1007<br>C-250<br>Ulje motora nakon 2260h<br>Uzorkovano: 03.09.12. | 842<br>NOVO ULJE<br>P-C Sentron LD 5000<br>Uzorkovano: 02.08.12. | Grafična vrijednost<br>i/ili<br>napomena               |
|--|---|--|--|---|--|--|
| Značajka kvalitete:                                    |   |  |  |   |  |  |
| ☐ Analiza po Stabingeru (ASTM D7042)                   |   |  |  |   |  | Viskoznost:<br>+ 20%<br>- 10%<br>u odnosu na novo ulje |
| Gustoća, 15 °C, kg/dm <sup>3</sup>                     | 0,8791  | 0,8800   | 0,8811   | 0,8824  | 0,8772   |  |
| Viskoz., 40 °C mm <sup>2</sup> /s                      | 124,45  | 129,19   | 131,94   | 136,24  | 122,09   |  |
| Viskoz., 100 °C mm <sup>2</sup> /s                     | 13,653  | 14,018   | 14,183   | 14,427  | 13,357   |  |
| Indeks viskoznosti (VI)                                | +106,0  | +106,1   | +105,5   | +104,6  | 104,4  |  |
| ☐ Voda, mas. %; (ASTM D 6304)                          | 0,026   | 0,024  | 0,031  | 0,025   | 0,021  | < 0,1  |
| ☐ Stanište, °C (ASTM D 97)                             | - 22  | - 20   | - 23   | - 24  | - 23   | pratiti  |
| ☐ Plamište, Cleveland, °C (ASTM D 92, HRN EN ISO 2592) | 260   | 264  | 266  | 266   | 268  | smanjenje za 20 °C                                     |
| *Krom, ppm   | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   | < 4 ppm (između uzorkovanja)                           |
| *Bakar, ppm  | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| *Željezo, ppm  | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| *Olovo, ppm  | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| *Kositar, ppm  | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| *Aluminij, ppm   | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| *Nikal, ppm  | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| *Kadmij, ppm   | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| *Magnezij, ppm   | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   | ± 25 % od novog ulja                                   |
| *Barij, ppm  | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| *Kalcij, ppm   | 2400  | 2400   | 2530   | 2030  | 2330   |  |
| *Fosfor, ppm   | 400   | 400  | 400  | 340   | 430  |  |
| *Cink, ppm   | 500   | 500  | 510  | 450   | 440  | < 5 ppm  |
| *Silicij, ppm  | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| *Natrij, ppm   | <1  | <1   | <1   | <1  | <1   |  |
| Kiselinski broj, mgKOH/g (ASTM D 664)                  | 1,531   | 1,449  | 1,324  | 1,570   | 1,064  | povećanje za 3,0 mgKOH/g u odnosu na novo ulje         |
| UPOZORENJE:  | -   | -  | -  | -   | -  |  |

Tablica 2: FT-IR analiza ulja za podmazivanje (Varian Oil Analyser)

| Ev. broj i naziv uzorka: | 688<br>C-250<br>Ulje motora nakon 500h<br>Uzorkovano: 19.06.12. | 768<br>C-250<br>Ulje motora nakon 1000h<br>Uzorkovano: 12.07.12. | 841<br>C-250<br>Ulje motora nakon 1550h<br>Uzorkovano: 02.08.12. | 1007<br>C-250<br>Ulje motora nakon 2260h<br>Uzorkovano: 03.09.12. | 842<br>NOVO ULJE<br>P-C Sentron LD 5000<br>Uzorkovano: 02.08.12. | Grafična vrijednost<br>i/ili<br>napomena |
|--------------------------|---|--|--|---|--|--|
| Značajka kvalitete:      |   |  |  |   |  |  |
| Voda                     | 12  | 13   | 14   | 15  | 8  | 40                                       |
| Čada                     | 0   | 0  | 0  | 0   | 0  | 20                                       |
| Oksidacija               | 10  | 12   | 14   | 16  | 9  | 18                                       |
| Nitracija                | 5   | 6  | 7  | 8   | 3  | 14                                       |
| Očitanje aditiva         | 11  | 11   | 12   | 12  | 11   | Ispod 5                                  |
| Dizel                    | 199   | 200  | 200  | 199   | 198  | 255                                      |
| Sulfatacija              | 16  | 17   | 18   | 20  | 15   | 35                                       |
| Antifriz                 | 1   | 1  | 2  | 2   | 1  | 3  |
| Bazni broj               | 2,5   | 1,9  | 1,3  | 0,5   | 2,4  | 30 % vrijednosti novog ulja              |
| UPOZORENJE:              | -   | -  | -  | Bazni broj  | -  |  |

Slika 20. Analize ulja nakon 500h, 1000h, 1550h i 2260h

## REZULTATI

Uzorak: Ulje Petro-Canada SENTRON LD 5000 iz plinskog motora C-250

Tablica 1: Fizikalno-kemijska svojstva ulja za podmazivanje

| Ev. broj i naziv uzorka:                               | 841<br>C-250<br>Ulje motora nakon 1550h<br>Uzorkovano: 02.08.12. | 1007<br>C-250<br>Ulje motora nakon 2260h<br>Uzorkovano: 03.09.12. | 1231<br>C-250<br>Ulje motora nakon 2500h<br>Uzorkovano: 27.09.12. | 842<br>NOVO ULJE<br>P-C Sentron LD 5000<br>Uzorkovano: 02.08.12. | 1232<br>NOVO ULJE<br>P-C Sentron LD 5000<br>Uzorkovano: 27.09.12. | Granična vrijednost<br>i/ili<br>napomena               |
|--|--|---|---|--|---|--|
| Značajka kvalitete:                                    |  |   |   |  |   |  |
| ☐ Analiza po Stabingeru (ASTM D7042)                   |  |   |   |  |   | Viskoznost:<br>+ 20%<br>- 10%<br>u odnosu na novo ulje |
| Gustoća, 15 °C, kg/dm <sup>3</sup>                     | 0,8811   | 0,8824  | 0,8826  | 0,8772   | 0,8773  |  |
| Viskozn., 40 °C mm <sup>2</sup> /s                     | 131,94   | 136,24  | 138,41  | 122,09   | 122,55  |  |
| Viskozn., 100 °C mm <sup>2</sup> /s                    | 14,183   | 14,427  | 14,474  | 13,357   | 13,507  |  |
| Indeks viskoznosti (VI)                                | +105,5   | +104,6  | +103,1  | 104,4  | 106,0   |  |
| ☐ Voda, mas. %; (ASTM D 6304)                          | 0,031  | 0,025   | 0,023   | 0,021  | 0,017   | < 0,1  |
| ☐ Stišće, °C (ASTM D 97)                               | - 23   | - 24  | - 21  | - 23   | - 21  | pratiti  |
| ☐ Plamište, Cleveland, °C (ASTM D 92, HRN EN ISO 2592) | 266  | 266   | 262   | 268  | 268   | smanjenje za 20 °C                                     |
| *Krom, ppm   | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  | < 4 ppm<br>(između uzorkovanja)                        |
| *Bakar, ppm  | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  |  |
| *Željezo, ppm  | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  |  |
| *Olovo, ppm  | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  |  |
| *Kositar, ppm  | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  |  |
| *Aluminij, ppm   | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  |  |
| *Nikal, ppm  | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  |  |
| *Kadmij, ppm   | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  |  |
| *Magnezij, ppm   | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  | ± 25 % od novog ulja                                   |
| *Barij, ppm  | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  |  |
| *Kalcij, ppm   | 2530   | 2030  | 2540  | 2330   | 2230  |  |
| *Fosfor, ppm   | 400  | 340   | 520   | 430  | 460   |  |
| *Cink, ppm   | 510  | 450   | 550   | 440  | 500   |  |
| *Silicij, ppm  | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  | < 5 ppm  |
| *Natrij, ppm   | <1   | <1  | <1  | <1   | <1  |  |
| Kiselinski broj, mgKOH/g (ASTM D 664)                  | 1,324  | 1,570   | 1,630   | 1,064  | 1,155   | povećanje za 3,0 mgKOH/g u odnosu na novo ulje         |
| UPOZORENJE:  | -  | -   | -   | -  | -   |  |

Tablica 2: FT-IR analiza ulja za podmazivanje (Varian Oil Analyser)

| Ev. broj i naziv uzorka: | 841<br>C-250<br>Ulje motora nakon 1550h<br>Uzorkovano: 02.08.12. | 1007<br>C-250<br>Ulje motora nakon 2260h<br>Uzorkovano: 03.09.12. | 1231<br>C-250<br>Ulje motora nakon 2500h<br>Uzorkovano: 27.09.12. | 842<br>NOVO ULJE<br>P-C Sentron LD 5000<br>Uzorkovano: 02.08.12. | 1232<br>NOVO ULJE<br>P-C Sentron LD 5000<br>Uzorkovano: 27.09.12. | Granična vrijednost<br>i/ili<br>napomena |
|--------------------------|--|---|---|--|---|--|
| Voda                     | 14   | 15  | 15  | 8  | 8   | 40                                       |
| Čada                     | 0  | 0   | 0   | 0  | 0   | 20                                       |
| Oksidacija               | 14   | 16  | 18  | 9  | 9   | 18                                       |
| Nitracija                | 7  | 8   | 8   | 3  | 3   | 14                                       |
| Očitavanje aditiva       | 12   | 12  | 12  | 11   | 11  | Ispod 5                                  |
| Dizel                    | 200  | 199   | 196   | 198  | 198   | 255                                      |
| Sulfatacija              | 18   | 20  | 20  | 15   | 15  | 35                                       |
| Antifriz                 | 2  | 2   | 1   | 1  | 0   | 3  |
| Bazni broj               | 1,3  | 0,5   | 0,2   | 2,4  | 2,2   | 30 % vrijednosti novog ulja              |
| UPOZORENJE:              | -  | Bazni broj  | Oksidacija, bazni broj  | -  | -   |  |

Slika 21. Analize ulja nakon 1550h, 2260h i 2500h

## 7. ZAKLJUČAK

Pri upotrebi maziva bitno je odabrati ispravno mazivo i održavati ga čistim, svježim i bez prisustva vlage. U praksi, to povlači za sobom brojne tehnologije i pravila koja osiguravaju ispunjenje prethodnih uvjeta, a što u znatnoj mjeri ovisi o vrsti aplikacije i njenoj specifičnosti. Ispravno održavanje maziva povećava radnu sposobnost tehničkog sustava, produžava njegov radni vijek kao i vijek maziva.

Iz svega prikazanog može se zaključiti da su metode koje se u INA d.d. koriste za analizu motornog ulja, prikladne za praćenje trošenja dijelova plinskih motora i određivanje intervala zamjene ulja u plinskim motorima. Ovakvim metodama može se optimirati održavanje, odnosno svesti zastoje, a time i troškove odražavanja, na minimum.

Interval zamjene ulja u plinskim motorima Waukesha VGF H24GL iznosi 2500 radnih sati a primjenjuje se od Listopada 2012 g. Do danas nisu zabilježeni nikakvi problemi u radu navedenih motora a koji bi bili uzrokovani pogrešnim odabirom ulja ili predugim intervalom zamjene ulja.

## 8. LITERATURA

- [1] Grupa autora: Maziva i podmazivanje: JUGOMA, Zagreb, 1986.
- [2] D.Krpan, D.Jeras: Laki motori II, Liber, Zagreb, 1979.
- [3] Perić R. Sreten: Savremene metode analize ulja u tehničkim sistemima, Beograd, 2009.
- [4] G.Marić, V. Ivušić: Praćenje trošenja četverotaktnog motora analizom ulja, Zagreb, 2002.
- [5] Grupa autora: Predviđanje svojstava rabljenih mazivih ulja primjenom infracrvene spektroskopije i multivarijantne analize, Zagreb, 2012.
- [6] D.Doležal, T.Belamarić: Praćenje ulja za podmazivanje pomoću isplative metodologije, Zagreb, 2012.

Internet lokacije:

- [7] [http://www.ina-maziva.hr/hr/podrska/tehnicke-informacije/46?teh\\_kar=3](http://www.ina-maziva.hr/hr/podrska/tehnicke-informacije/46?teh_kar=3)
- [8] <http://modricaoil.com/tehnicka-podrska/a-b-c-o-mazivima/>
- [9] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Podmazivanje>
- [10] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Maziva>



## 9. PRILOZI

### 9.1. POPIS SIMBOLA

| <b>Oznaka</b> | <b>Značenje</b>        | <b>Mjerna jedinica</b> |
|---------------|------------------------|------------------------|
| TAN           | Ukupni kiselinski broj | mg KOH/g               |
| TBN           | Ukupni bazni broj      | mg KOH/g               |

## 9.2. POPIS SLIKA

| <b>Slika</b>   | <b>Strana</b> |
|--|---------------|
| Slika 1. Ulje sa različitim veličinama viskoznosti.....                                  | 9             |
| Slika 2. Tipična fizikalno-kemijska svojstva ulja (Mobil Pegasus 710).....               | 12            |
| Slika 3. Ispravno skladištenje bačava (horizontalni položaj).....                        | 14            |
| Slika 4. Kontaminati ulja za podmazivanje.....   | 17            |
| Slika 5. Analiza sadržaja različitih metala prisutnih u ulju.....                        | 22            |
| Slika 6. Unutrašnja cirkulacija ulja u motoru.....                                       | 26            |
| Slika 7. Efikasnost detekcije spektrometrijskom analizom.....                            | 30            |
| Slika 8. Princip rada DR ferograma.....  | 32            |
| Slika 9. Plinski motor Waukesha VGF H24GL.....   | 34            |
| Slika 10. Stabinger-viskozimetar SVM 3000 (Anton Paar).....                              | 35            |
| Slika 11. FT-IR analizator ulja, model 640 (Varian).....                                 | 36            |
| Slika 12. Prikaz promjene viskoznosti kod 40°C u odnosu na radne sate plinskog motora... | 41            |
| Slika 13. Prikaz promjene viskoznosti kod 100°C u odnosu na radne sate plinskog motora.  | 41            |
| Slika 14. Prikaz promjene gustoće ulja u odnosu na radne sate plinskog motora.....       | 42            |
| Slika 15. Prikaz promjene plamišta ulja u odnosu na radne sate plinskog motora.....      | 42            |
| Slika 16. Prikaz promjene stiništa ulja u odnosu na radne sate plinskog motora.....      | 43            |
| Slika 17. Prikaz promjene TAN-a u odnosu na radne sate plinskog motora.....              | 43            |
| Slika 18. Prikaz promjene oksidacije ulja u odnosu na radne sate plinskog motora.....    | 44            |
| Slika 19. Prikaz promjene TBN-a u odnosu na radne sate plinskog motora.....              | 45            |
| Slika 20. Analize ulja nakon 500h, 1000h, 1550h i 2260h.....                             | 47            |
| Slika 21. Analize ulja nakon 1550h, 2260h i 2500h.....                                   | 48            |

### 9.3. POPIS TABLICA

| <b>Tablica</b>  | <b>Strana</b> |
|---|---------------|
| Tablica 1. Pregled kontaminirajućih tvari sa osnovnim uzrocima kontaminacije i<br>posljedicama..... | 19            |
| Tablica 2. Dozvoljene količine elemenata u motornom ulju koje je uzorkovano.....                    | 21            |
| Tablica 3. Standardni elementi kod analize čestica trošenja motornog ulja.....                      | 30            |
| Tablica 4. Ispitivanja fizikalno-kemijskih svojstava ulja za podmazivanje.....                      | 39            |