

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

## **Motorové oleje v letectví**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vypracoval: Jan Veselý

Praha 2016

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jan Veselý

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Motorové oleje v letectví**

Název anglicky

**Motor oils in aviation**

---

### Cíle práce

Cílem práce je provést analýzy motorových olejů v letadlech a na základě těchto analýz navrhnout doporučení pro údržbu spalovacího motoru.

### Metodika

1) Úvod

2) Rozbor současného stavu (literární rozbor motorových olejů používaných v pohonných jednotkách letadel, popis základních vlastností a požadavků na letecké oleje, možných znečištění a možností posuzování technického stavu motoru v závislosti na výsledcích tribodiagnostických analýz)

3) Cíl a metodika práce

4) Výsledky (odběr vzorků motorového oleje, provedení zvolených analýz motorového oleje, vyhodnocení měřených dat a doporučení z hlediska plánované údržby motoru v letectví)

5) Závěr

**Doporučený rozsah práce**

50-60

**Klíčová slova**

motorový olej, technický stav, motor, letadlo

---

**Doporučené zdroje informací**

BEČKA, J.: Tribologie, Praha: vydavatelství ČVUT, 1997, 212s, ISBN 80-01-01621-8

HELEBRANT, F a kol. Technická diagnostika a spolehlivost I. tribodiagnostika. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2001. 158 s. ISBN 80-7078-883-6

Normy a předpisy, periodika a firemní literatura

VLK, František. Paliva a maziva motorových vozidel. Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2006. ISBN 80-239-6461-5

---

**Předběžný termín obhajoby**

2015/16 LS – TF

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

---

Elektronicky schváleno dne 20. 4. 2015

**doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 27. 4. 2015

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 19. 03. 2016

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Motorové oleje v letectví vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 31.3.2016

.....

Jan Veselý

**Poděkování:**

V úvodu mé diplomové práce patří poděkování vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D. za dohlížení, připomínky a pomoc při jejím zpracování. Další poděkování patří letecké škole FLY FOR FUN s.r.o. za poskytnutí letadlové techniky pro měření, včetně jejich cenných rad.

**Abstrakt:**

Cílem této diplomové práce bylo literárně zpracovat problematiku tribodiagnostiky, leteckých olejů používaných výhradně pro pístové motory, provedení analýzy odebraných vzorků oleje ze sledovaných motorů během provozu, a na základě výsledků znázorněných pomocí grafů, vyhodnotit a doporučit korekce v jejich údržbě. V kapitole Rozbor současného stavu je popsán princip práce mazací soustavy leteckých motorů včetně vlastností motorových olejů a požadavků na ně kladených. Poslední část rešerše je věnována tribodiagnostice. V kapitole Cíl práce a metodika jsou popsány stroje, na kterých bylo měření prováděno a metodika provádění jednotlivých tribodiagnostických analýz a odběru vzorků. Kapitola Výsledky obsahuje grafy vytvořené z naměřených hodnot včetně dílčího závěru z měření a diskuze.

**Klíčová slova:** motorový olej, technický stav, motor, letadlo

## **Motor oils in aviation**

**Abstract:**

The aim of this thesis was to handle the problems of the literary tribodiagnostic, aviation oils using in piston engines and to provide analysis from taking oil samples from monitoring engines during working, evaluate it and recommend corection in maintenance service of these engines on based results typify as graphs. In chapter Analysis of the present state, there is described principle of working oil system in aviation engines including attributes of motor oils and demand requirements. The last part in this chapter is devoted to tribodiagnostic. In chapter Objective and methodology of thesis, there are described the machine on which the measurement was carried out and the methodology of individual tribodiagnostic analysis and sampling. Chapter Results contains the graphs based on the measured values including partial conclusion of the measurement and discussion.

**Key words:** motor oil, technical condition, engine, aircraft

# Obsah

1. Úvod .....	1
2. Rozbor současného stavu.....	2
2.1 Olejová soustava leteckého pístového motoru .....	2
2.1.1 Provoz olejové soustavy .....	4
2.1.2 Letecké mazací oleje .....	4
2.1.3 Základní vlastnosti olejů.....	6
2.2 Tribodiagnostická analýza .....	12
2.2.1 Znehodnocení motorových olejů.....	14
2.2.2 Tribodiagnostické metody .....	17
3. Cíl a metodika práce .....	25
3.1 Metodika měření viskozity přístrojem SVM 3000 .....	27
3.2 Metodika měření podílu paliva v oleji přístrojem Fuel Sniffer .....	28
3.3 Metodika analýzy částic laserový analyzátozem LaserNet Fines®-C.....	29
3.4 Metodika měření obsahu vody přístrojem Coulometer WTD.....	31
3.5 Metodika měření bodu vzplanutí podle Penskyho-Martense .....	31
3.6 Metodika měření na ferografu Spectro T <sup>2</sup> FM Q <sup>500</sup> .....	33
3.7 Metodika odběru vzorků oleje.....	34
4. Výsledky.....	36
4.1 Výsledky stanovení viskozity a hustoty přístrojem SVM 3000 .....	36
4.2 Výsledky stanovení procentního podílu paliva na přístroji Fuel Sniffer.....	37
4.3 Výsledky analýzy částic pomocí LaserNet Fines®-C .....	39
4.3.1 Částicová analýza motoru Continental O-200-A.....	40
4.3.2 Částicová analýza motoru Rotax 912 UL.....	43
4.4 Výsledky stanovení obsahu vody přístrojem Coulometer WTD.....	47
4.5 Vyhodnocení měření a diskuze.....	49
5. Závěr.....	55

Seznam použité literatury .....	57
Seznam obrázků.....	61
Seznam příloh.....	63



# 1. Úvod

Neustálé snižování nákladů na provoz. Toto je dnes cílem většiny podniků bez ohledu na jejich zaměření. Tento důvod je i příčinou vzestupu tribodiagnostiky jako vědního oboru, která dokáže napomoci ke snížení nákladů na provoz jakéhokoli stroje, kde lze využít poznatky ohledně charakteristiky maziv a jejich správného využití. Právě mazivo je nositelem obrovského množství informací, se kterými pomocí poznatků z tribodiagnostiky můžeme pracovat, a je tak možno sledovat technický stav strojního zařízení, optimalizovat údržbu, pozměňovat provozní vytiženost stroje a chování se k němu. Všechny tyto kroky nakonec vedou ke snížení provozních výdajů a v neposlední řadě i ke zvýšení životnosti strojů.

Tribodiagnostických metod je řada a každá dokáže přinést velmi mnoho potřebných a důležitých informací. Diagnostika maziv přináší možnost bezdemontážního posouzení technického stavu stroje, což znamená i úsporu v lidské práci a prostojích tohoto stroje. Takto neinvazivním zásahem tak ani nedochází ke zbytečným zásahům v konstrukci a celistvosti strojní skupiny. Tribodiagnostická analýza předává výrobcům maziv zpětnou vazbu o funkčnosti a potřebě svých výrobků a jsou tak tlačeni k neustálému zvyšování kvality maziv. Právě maziva prošla obrovským rozvojem. Výrobců a produktů, které nabízejí je mnoho. Podrobná analýza maziva, tj. množství, druh, velikost atd., tedy kompletní morfologie částic, množství vody, těkavých látek a mnoho dalších informací, které je možno z oleje dostat napomáhá k lepšímu posouzení technického stavu a možnosti lepšího přizpůsobení se provozním podmínkám, a tak i výběru správného maziva.

Letectví se stalo díky jeho obrovskému rozvoji, a to hlavně v přepravě velkého počtu cestujících a velmi tvrdých a proměnlivých provozních podmínkách, největším průkopníkem a uživatelem tribodiagnostických analýz. Létání je nejbezpečnějším druhem přepravy a každá možná činnost provedená za účelem zvýšení bezpečnosti je zde vítána. Tribodiagnostika dokáže v určitých případech předvídat změnu technického stavu jakékoli strojní skupiny a při většině prováděných údržbách na letounech je jí za tímto účelem hojně využíváno. Samozřejmě hodnota letounů, tj. jejich cena, a cena za lidský život je nejvýznamnějším motorem pro rozvoj triboanalýzy a jejímu důkladnému provádění a to nejenom v oblasti letectví, ale v každém jiném odvětví, kde je možné tyto analýzy provádět.

## 2. Rozbor současného stavu

### 2.1 Olejová soustava leteckého pístového motoru

Olejová soustava je definována jako souhrn všech částí zajišťujících mazání pohonné jednotky (jednotek). Musí dodávat ke všem určeným místům potřebné množství mazacího oleje o předepsané čistotě, teplotě a tlaku. [1]

Olejová soustava musí plnit následující požadavky:

- musí spolehlivě pracovat při libovolných podmínkách letu, v širokém rozmezí rychlostí, výšek letu a teplot okolního vzduchu,
- zajišťovat dostatečné chlazení oleje,
- vykazovat minimální spotřebu oleje,
- součásti olejové soustavy musí mít dostatečnou pevnost a odolnost proti vibracím, malý hydraulický odpor a těsné spoje (tato těsnost je důležitá i z hlediska vzniku požáru, proti kterému musí být tato soustava zabezpečena),
- být nenáročná pro obsluhu a provoz, provedení letadla má být takové, aby byl lehký přístup k jednotlivým letadlovým celkům, možnost rychlého plnění a kontroly stavu oleje v nádrži, po dobu celého letu musí být také zabezpečena správná funkčnost kontrolních a měřících přístrojů indikující údaje o tlaku a teplotě oleje v soustavě.[2]

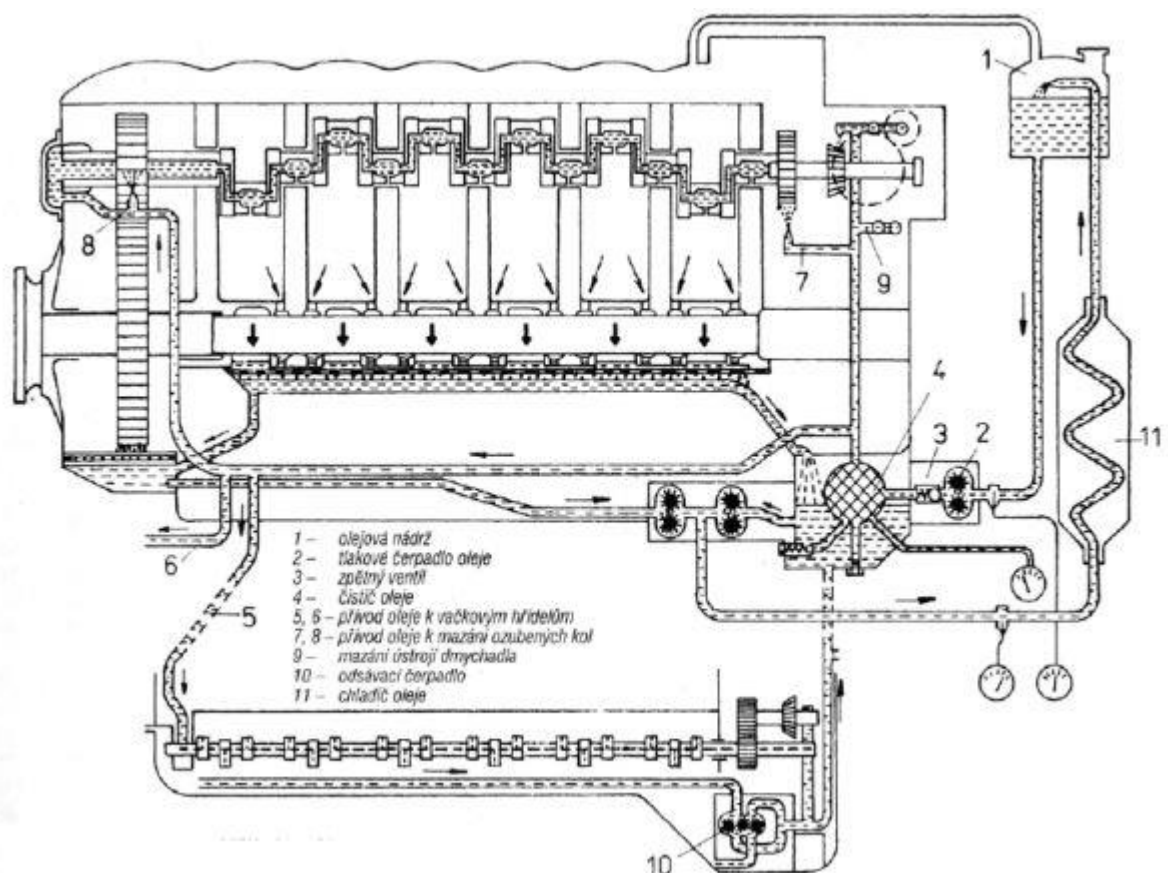
Olej dodávaný mazací soustavou plní následující funkce:

- maže třecí plochy a tím snižuje tření a opotřebení,
- odvádí teplo vzniklé třením a chrání některé namáhané součástky,
- chrání součásti motoru před korozí,
- slouží jako hydraulická kapalina v systémech motoru a vrtule,
- ohřívá části palivové soustavy.

Letadlové pístové motory téměř výhradně používají tlakovou mazací soustavu se suchou klikovou skříní. Tlakové čerpadlo dodává olej přicházející z olejové nádrže k mazaným místům soustavou kanálků a potrubí. Tímto tlakovým olejem se mažou nejvíce namáhaná místa, jsou to hlavně ložiska klikového hřídele, rozvodového ústrojí, ložiska a ozubená soukolí reduktorů, ložiska a třecí plochy pohonů i agregátů. Ostatní plochy, které nejsou tolik namáhána, jsou mazána odstříkujícím olejem, který vytéká vůlemi z tlakově mazaných částí. Odkapávající olej odtéká do sběračů, odkud je odčerpáván zpět do olejové nádrže.

Tlakový olej se také používá v servosystémech motoru, vrtule a jejich soustav (např. regulátor otáček, omezovač plnicího tlaku, korektor směsi atd).

Mazací soustava se skládá z vnitřní soustavy, jejíž části jsou umístěny uvnitř nebo na motoru a z vnější soustavy upevněné k draku letadla. Vnější mazací soustava je definována jako část mezi potrubím přivádějícím olej z nádrže k olejovému čerpadlu a potrubím přivádějícím olej zpět do nádrže.[3]

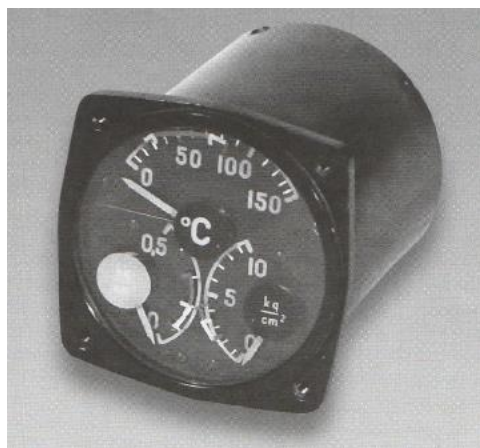


**Obrázek 1 Schéma mazací soustavy řadového motoru [3]**

### 2.1.1 Provoz olejové soustavy

Ošetřování olejové soustavy a její obsluha je součástí komplexní přípravy pohonných jednotek na let a provádí se v rámci plánované údržby, tj. předletová prohlídka, předepsaná periodická revize, popřípadě neplánované údržby, tj. odstraňování poruch.

Během prohlídky letadla před letem je nejdůležitější kontrola stavu oleje, případně jeho dolití a kontrola stavu potrubí a těsnosti spojů. Velkou pozornost by měl pilot či mechanik věnovat právě samotnému plnění oleje do soustavy. Je nutné kontrolovat, zda olej odpovídá normě a také dolévat jeho správné množství. Nedostatečná náplň může vést k poklesu tlaku ve výškách, nadměrné množství oleje je příčinou jeho vystřikování odvodušněním. Samozřejmě neméně důležitá je kontrola funkce mazací soustavy během chodu motoru. Po nastartování pilot kontroluje tlak oleje v soustavě. Před vzletovým režimem je důležité dosáhnout provozní teploty oleje. Tyto veličiny jako je teplota a tlak oleje jsou sledovány po dobu celého letu. Na těchto ukazatelích totiž závisí spolehlivost mazání, výškovost olejové soustavy a správná práce motoru.



*Obrázek 2 Kombinovaný ukazatel tlaku oleje, tlaku paliva a teploty oleje [4]*

Správná a pravidelně prováděná kontrola mazací soustavy motoru umožňuje zkrácení rozsahu předepsaných prací na minimum, významně zvyšuje bezpečnost letu a udržuje motor v letuschopném stavu. [2]

### 2.1.2 Letecké mazací oleje

Letecké mazací oleje jsou děleny podle toho, v jakém druhu leteckého motoru budou pracovat. Každý druh motoru totiž klade jiné požadavky na jakost používaného oleje.

Motorové oleje jsou rozděleny na:

1. mazací oleje pro pístové motory,
2. mazací oleje pro turbínové motory,
  - mazací oleje pro turboreaktivní motory,
  - mazací oleje pro turbovrtulové motory. [3]

Na kvalitě leteckého oleje je velmi závislá životnost a spolehlivost každého letadlového motoru. Proto se i během pracovního oběhu oleje účinně ochlazují, je tak zvýšena jejich schopnost mazat ihned po vstupu do motoru. Tyto oleje se nechávají v olejové nádrži ustát, tj. odpěnit a zbavují se všech mechanických nečistot, které olej po výstupu z motoru obsahoval. Současně se samozřejmě musí udržovat provozní teplota oleje na předepsaných hodnotách.

Olej musí zajistit dokonalé kapalinné mazání ve všech třecích uzlech motoru v celém rozsahu rychlostí, teplot a zatížení. Pokud není možné z provozních důvodů, a to např. při spouštění motoru zajistit kapalinné tření, měl by olej zajistit alespoň minimální součinitel tření s nejmenším opotřebením. Olej má také při provozu měnit své základní vlastnosti co nejméně. Dochází tak při změnách teploty, tlaku a okysličování. Při těchto změnách by se z oleje neměly vylučovat žádné tuhé nebo plastické usazeniny a žádné agresivní látky. [3]

Jako maziva letadlových pístových motorů se používají minerální oleje, minerální oleje s aditivami a syntetické oleje. Druh motorového oleje použit pro každý z leteckých motorů musí být striktně dodržen a je uveden v provozní příručce letadla a motoru. U těchto olejů se požaduje výborná viskozita zaručující dobrou mazivost, viskózní stálost při vyšších teplotách a chemická čistota.

Po mnoho let byly výkony leteckých pístových motorů takové, že bylo naprosto dostačující vypořádat se s mazáním pomocí minerálních olejů smíchaných ze speciálně vybraných ropných základových olejů. Avšak stoupající poptávka po olejích s vyšším stupněm tepelné a oxidační stability donutila výrobce olejů obohatit tyto oleje malým množstvím neropných látek. První aditiva přidávaná do minerálních olejů byla založena na kovových solích barya a vápníku. Výkonnost těchto olejů vzhledem k oxidaci a tepelné stabilitě byla vynikající. Zvýšila se tak i životnost motorů. Problémem ale bylo usazování spálených složek oleje odvozených od aditiv obsahujících kovy ve spalovacích komorách pístových motorů. [7]

Důležitou vlastností těchto olejů je ovšem skutečnost, že zmíněná aditiva jsou chemicky natolik aktivní, že reagují s látkami vznikajícími v motoru při použití klasického minerálního oleje bez přísad. Rozpouštěním těchto látek dochází k ucpávání olejového systému motoru a to má za následek poruchy mazání. Je tak naprostou nutností používat pro provoz motoru pouze jeden z uvedených druhů olejů a to buď čistý minerální, nebo minerální aditivovaný. [1]

K překonání problému s usazeninami ve spalovací komoře byla vyvinuta nová, nekovová, tj. bezpopelnatá přísada do vybraných minerálních olejů. Většina provozovatelů letadel tak ihned přešla na tento typ oleje. Tato skutečnost však neznamená vymizení tzv. čistých minerálních olejů z trhu. Své uplatnění totiž našly při záběhu leteckých pístových

spalovacích motorů. Používají se pro prvních 25 až 100 letových hodin a dokud se neustálí spotřeba oleje.

V 80. letech přichází na trh další druh leteckých olejů. Byly to polosyntetické oleje. Tyto oleje jsou směs minerálního oleje a více jak 50 % syntetických uhlovodíků. Výhodou polosyntetických olejů je zlepšená nízkoteplotní čerpatelnost a jeho stabilita při vysokých teplotách, kterou zajišťuje právě přítomnost syntetické složky. Přítomnost minerálního oleje poté napomáhá k rozpouštění vedlejších produktů spalování a udržuje tak spalovací komoru daleko čistší.

Do těchto olejů jsou pak přidávána ještě aditiva pro jeho ještě lepší vlastnosti. Mohou to být například aditiva pro snížení opotřebenosti kritických součástí motoru, jako je vačkový hřídel, zdvihátka a další vysoce otěrové části motoru. Dále se přidávají antikorozi aditiva, která pomáhají chránit méně používané letecké motory a motory pracující ve vysoko-vlhkostních klimatických podmínkách proti zvýšené oxidaci. Tyto oleje také lépe odolávají vysoko-teplotní oxidaci u tepelně více namáhaných motorů. Všechny tyto vlastnosti zaručí spolehlivější dosažení TBO (time between overhaul-počet hodin v provozu do generální opravy) daného motoru.[2]

Plně syntetické oleje jsou pak vhodné pro moderní pístové letecké motory pracující s palivy jako JET A a JET A-1, a jsou tedy vyvinuty pro použití v přeplňovaných dieselových motorech a to za všech provozních podmínek.

Po zaměření se na mazání turbínových motorů je mluveno výlučně o olejích syntetických. Na rozdíl od minerálních olejů jsou totiž schopné pracovat při daleko vyšších teplotách. V moderních turbínových motorech jsou otáčky rotorů a pracovní teploty tak vysoké, že minerální oleje by se zde napalovaly a oxidovaly. Docházelo by i k pění. Syntetické oleje dokáží udržet mazací film na valivých ložiskách i při velmi vysokých otáčkách a nejsou tolik náchylné na změnu viskozity při nízkých teplotách. Tato vlastnost je důležitá při studených startech motoru. Syntetické oleje s nízkou viskozitou je také možné použít díky konstrukčnímu uspořádání turbínových motorů. V turbínách totiž nejsou vzájemně se posouvající mazací plochy a ani ozubené převody s velmi vysokým zatížením.

### **2.1.3 Základní vlastnosti olejů**

#### **Viskozita**

*„Viskozita je schopnost tekutiny přenášet tečná napětí. Je příčinou odporu, který klade proudící tekutina vzájemnému posouvání sousedících vrstev tekutiny. Na stykové ploše dvou vrstev s rozdílnou rychlostí vzniká tečné napětí úměrné růstu rychlosti ve směru osy x.“ [4]*

Viskózní charakteristika oleje udává závislost viskozity na teplotě. Viskozita olejů klesá se stoupající teplotou. Pevnost olejového mazacího filmu je závislá na viskozitě. Viskozita má být tak vysoká, aby se olejový film neporušil, a současně tak nízká, aby mechanické ztráty třením byly co nejmenší. Viskozita má být taková, aby opotřebení při startu bylo minimální. [3]

Viskozitní index vyjadřuje změny viskozity v závislosti na teplotě. Čím má olej vyšší (lepší) viskozitní index, tím je změna viskozity v závislosti na teplotě menší, tím se dá i říct, že je olej kvalitnější. [8]

Viskozita udávající vnitřní tření tekutin je dána Newtonovým zákonem:

$$\tau = \eta \frac{\Delta c}{\Delta y} \quad (1)$$

$\tau$  ... *smykové napětí* [Pa]

$\eta$  ... *dynamická viskozita* [N.s.m<sup>-2</sup>]

$\Delta c$  ... *přírůstek rychlosti* [m.s<sup>-1</sup>]

$\Delta y$  ... *přírůstek vzdálenosti* [m]

Jednotka dynamické viskozity odpovídá tečné síle F=1N, která je nutná k přesunutí dvou stejných rovinných ploch o S=1m<sup>2</sup> vzdálených od sebe o  $\Delta y = 1m$  za přírůstku rychlosti  $\Delta c = 1m.s^{-1}$ .

### Kinematická viskozita

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

$\nu$  ... *kinematická viskozita* [mm<sup>2</sup>/s]

$\rho$  ... *hustota oleje* [kg.m<sup>-3</sup>]

$\eta$  ... *dynamická viskozita* [N.s.m<sup>-2</sup>]

Určení ideální viskozity motorového oleje závisí na těchto parametrech:

- Teplota

Čím je provozní teplota vyšší, musí být i vyšší viskozita použitého motorového oleje.

- Zatížení

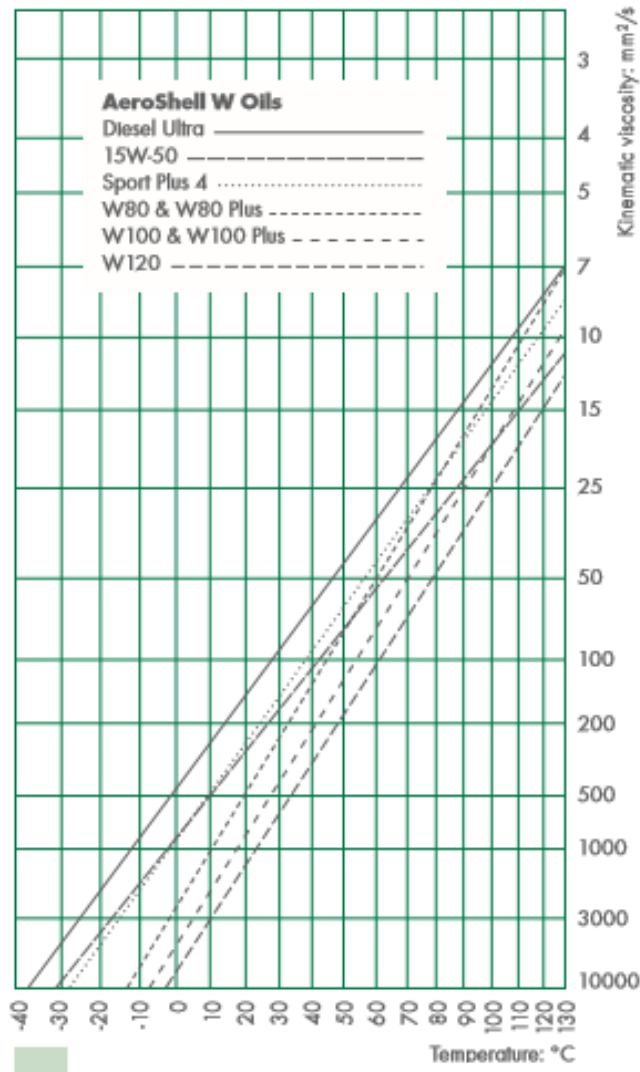
Čím je zatížení motorového oleje vyšší, tím je nutnější používat olej s vyšší viskozitou.

- Rychlost

Při zvyšování rychlosti vzájemného pohybu mazaných ploch se olej dostává obtížněji do mazaného prostoru odkud je vytlačován. Je tak nutné použít olej s menší viskozitou.

Závislost viskozity na teplotě leteckého oleje je znázorněna na obrázku 3. Oleje AeroShell 15W-50 a Sport Plus 4 jsou předmětem tribodiagnostického zkoumání v praktické části této diplomové práce a jeho viskozitní charakteristika je zde graficky nastíněna.

**TYPICAL TEMPERATURE/VISCOSITY CURVES OF AEROSHELL W OILS**



**Obrázek 3 Závislost kinematické viskozity na teplotě oleje [10]**



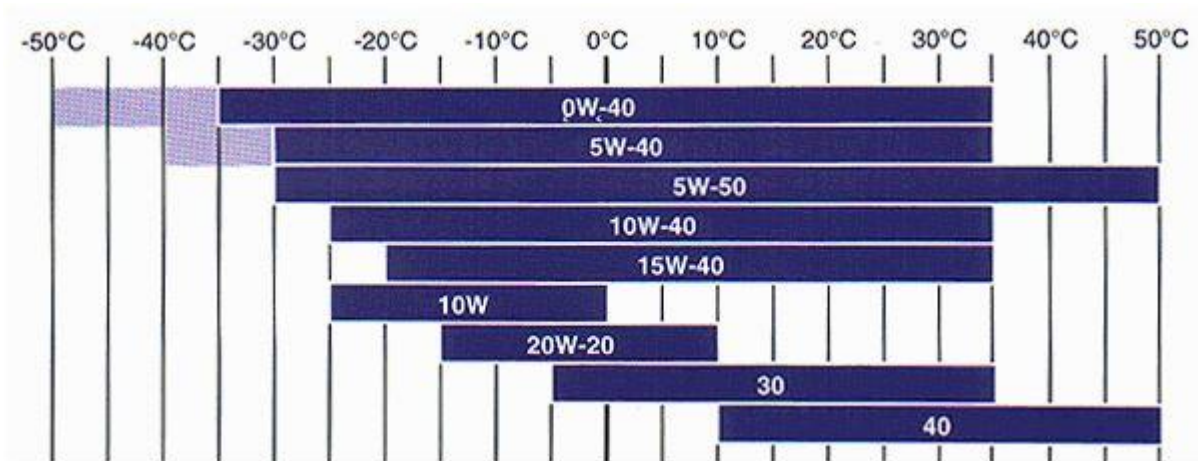
V letectví se používají dva systémy pro rozlišení viskozity olejů. Jsou to **Society of Automotive Engineers (SAE)** a **Saybold Universal**.

Norma **SAE** používá pro klasifikaci olejů 6 zimních tříd, které jsou označeny písmenem W (angl. Winter) a číslem, a pět letních tříd, které jsou označeny číslem. Tato čísla nepředstavují žádnou veličinu, ale jsou to bezrozměrná čísla. I přesto mají ale určitou analogii k viskozitě.

Zimní označení oleje znamená, že olej je možné použít v zimním období a vymezuje tzv. startovatelnost motoru při nízkých teplotách. Čím nižší je toto číslo, tím nižší může být i teplota okolí, při které je viskozita oleje taková, že stále zaručí snadné spouštění motoru. Toto číslo však závisí i na typu a velikosti daného motoru.

Letní označení zase udává schopnost oleje pracovat při vyšších teplotách okolí. Čím vyšší je toto číslo, tím vyšší může být i teplota okolní vzduchové hmoty, při které motor pracuje. Kdyby byl olej při vysokých teplotách příliš řídký, tj. měl velmi malou viskozitu, docházelo by ke strhávání olejového filmu a zhoršené mazání. Pro evropské klimatické podmínky jsou dostačující třídy 40 nebo 50, větší by už zapříčinily snížení výkonu motoru.

Oleje jsou děleny na jednorozsahové a vícerozsahové. Dnes se používají výhradně oleje vícerozsahové (multigrade), které umožňují celoroční dostatečné mazání motoru. Značí se kombinací zimní i letní třídy, např. 0W-40, 15W-50 atd. [11]



**Obrázek 4 Doporučené viskozitní třídy SAE motorových olejů podle vnějších teplot (°C) [11]**

Norma **Saybold Universal** udává v sekundách dobu výtoku 60 cm<sup>3</sup> oleje ohřátého na určitou teplotu (38 °C) přesně určeným měřicím otvorem. Tato doba výtoku pak charakterizuje olej. Porovnání obou systémů značení je uveden v následující tabulce.

Commercial SAE	Saybold Universal
30	60
40	80
50	100
60	120
70	140

*Obrázek 5 Převodní tabulka [4]*

### **Bod tuhnutí**

Teplota tuhnutí je taková teplota, kdy je zkoumaná látka už natolik pevná, že přestane téci. Je významným parametrem, který popisuje nízkoteplotní chování nejčastěji ropných látek (motorová nafta, topné oleje, mazací oleje atd.). Bod tuhnutí je důležitým ukazatelem startovacích vlastností oleje. Oleje běžně umožňují start do +5°C. Při nižších teplotách je doporučeno, aby se motor ohříval pozemním zdrojem, nebo jsou známy i případy, kdy se olej před startem motoru ředí benzínem (např. u vrtulníku Mi-4). [13]

### **Mazací vlastnost oleje**

Mazací vlastnosti oleje charakterizují schopnost zabránit opotřebení styčných ploch a práci s co nejmenším koeficientem tření.

### **Stabilita vůči oksidaci**

Tato vlastnost je charakterizována jako sklon oleje k vylučování usazenin. Ve spalovacím prostoru, ale i na jiných místech dochází vlivem vysokých teplot k rozkladu oleje a tvorbě karbonových úsad. Produkty karbonizace se nerozpouštějí v oleji a mají větší měrnou hmotnost, snadno se usazují a znečišťují mazací soustavu. Stykem s horkými povrchy pístů, pístních kroužků atd. přecházejí karbony v ještě složitější sloučeniny, které tvoří lakům podobnou vrstvu, již lze jen obtížně odstranit z povrchu kovů. Sklon různých olejů k tvorbě karbonu je různý. Pro určitý motor musí být tedy zvolen i vhodný olej. [3]

## Hustota

Hustota je charakterizována jako hmotnost objemové jednotky látky při dané teplotě.

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

$\rho$  ... hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$m$ ...hmotnost [ $\text{kg}$ ]

$V$ ...objem [ $\text{m}^3$ ]

## Bod vzplanutí

Udává nejnižší teplotu, na kterou musí být hořlavá kapalina zahřáta, aby po přiblížení plamene nad hladinu došlo ke vznícení par. Tato veličina se stanoví na normalizovaném zařízení podle ČSN 656191 a ČSN 656168. Podle bodu vzplanutí jsou hořlavé kapaliny rozděleny podle ČSN 650201 do čtyř tříd: [12]

**I. třída** - hořlaviny s bodem vzplanutí do 21 °C (aceton, diethylether, hexan, lehké benzíny, methanol, sirouhlík, nitrolaky – nitroředidla aj.),

**II. třída** - hořlaviny s bodem vzplanutí nad 21 °C do 55 °C (lakový benzín, petrolej, styren),

**III. třída** -hořlaviny s bodem vzplanutí nad 55 °C do 100 °C (motorová nafta, výševroucí petrolej),

**IV. třída** - hořlaviny s bodem vzplanutí nad 100 °C do 250 °C (topné oleje, anilin, nitrobenzen).

## Alkalita a kyselost

Při provozu motoru vznikají v oleji nežádoucí kyselé látky. Tyto látky mohou způsobit i vážnou korozi motoru. Do každého motorového oleje jsou tak přidávány alkalické sloučeniny, které působení kyselých látek neutralizují. Tato tzv. „alkalická rezerva oleje“ se vyjadřuje

pomocí hodnoty TBN (Total Base Number) a znamená celkové číslo alkality. Čím je tak TBN větší, tím dokáže olej déle neutralizovat kyselé složky.

Kyselost nových motorových olejů pochází z některých aditiv (např. antioxidanty nebo mazivostní přísady). Tyto přísady jsou ale vyžadovány pro jiné pozitivní účinky a je nutné je akceptovat a upravit tak obranyschopnost, tedy alkalitu oleje. Další kyselé látky vznikají během provozu motorového oleje při spalování paliva, ale například i v samotném oleji při jeho oxidační degradaci.

Kyselost oleje lze též vyjádřit měřitelnou hodnotou TAN (Total Acid Number) znamenající celkové číslo kyselosti. TAN vyjadřuje množství slabě i silně kyselých látek v oleji. TBN i TAN se vyjadřují ve stejných jednotkách – mg KOH/g. [32]

## 2.2 Tribodiagnostická analýza

*„Tribodiagnostika je jednou z metod technické bezdemontážní diagnostiky, která využívá maziva k objektivizaci zjištění technického stavu sledovaného objektu a objektivizaci zjištění kvality vlastního maziva“ [5]*

*„Tribodiagnostika rozšiřuje svou působnost na všechny druhy kontaktů mezi kinematickými dvojicemi strojů a snaží se jejich stav postihnout z výsledků analýz oleje, použitého v mazací soustavě“ [19]*

Při práci stroje nebo jiného strojního zařízení se se vzrůstajícím opotřebením uvolňují částice kovů nebo jejich sloučeniny. Všechny tyto sloučeniny jsou pak olejem vyplavovány z třecích míst a stávají se součástí olejové náplně. S dalším nárůstem opotřebením se pak procentuální podíl těchto příměsí v oleji zvyšuje. [5]

Olej je výborným nositelem informace o stavu motoru, zejména o uložení, těsnění a převodech. Tribodiagnostika této vlastnosti využívá. Cílem tribodiagnostických metod je kvalitativní sledování stavu oleje, kvantifikace změn v jeho složení a stanovení cizích elementů v olejové náplni, čímž se stává vhodným nástrojem pro vhodné využívání maziv. Z těchto všech parametrů je pak možno poukázat na případný výskyt a lokalizaci poruchy mazacího systému. Detailní analýza olejů vyžaduje využití až několika diagnostických metod. Tribodiagnostika poté využívá několika důležitých poznatků:[3]

- každá třecí dvojice je generátorem, tj. tvůrcem otěrových částic, určitý režim opotřebení je dán počtem, velikostí a tvarem částic,
- se stoupající intenzitou opotřebení se mění velikost částic, tvar částic (morfologie) a může docházet i ke změně chemického složení částic (k tomuto jevu může dojít vlivem vysoké teploty a následnou oxidací kovových částic),
- při změně režimu opotřebení se mění velikost, morfologie a počet částic s dostatečným předstihem - tohoto jevu je využíváno pro zavedení preventivní diagnostiky, tedy pro monitorování stavu třecích uzlů motoru. [3]

Sledování stavu opotřebení strojních zařízení, konkrétně pak třecích uzlů je provedeno na základě obsahu otěrových kovů v mazivu, kde je sledován hlavně trend těchto naměřených hodnot. Mazané třecí části strojního zařízení se opotřebovávají, cirkulující olej strhává stopové částice kovu a ty zůstávají v oleji ve formě suspenze. Pomocí tribodiagnostických metod je pak možné vyhodnotit množství, velikost a tvar těchto částic a je získán obraz o druhu opotřebení a technickém stavu jednotlivých třecích uzlů. Interpretace výsledků tribodiagnostiky poté umožňuje upozornit na možný výskyt vznikající poruchy a pomáhá lokalizovat místo vzniku mechanické závady. [5]

K podstatným úkolům tribodiagnostiky tedy patří stanovení jakosti čistých maziv při vstupní kontrole a zejména pak zjištění stavu opotřebovaného maziva během provozu vzhledem k jeho další použitelnosti ve strojním zařízení. Olej tak nemusí být nutně měněn při určitých výměnných lhůtách bez jakékoli informací o jeho kvalitě, ale realizace tribotechnické diagnostiky umožňuje využívat mazivo podle jeho fyzikálně-chemických kvalitativních ukazatelů o jeho stavu.[5]

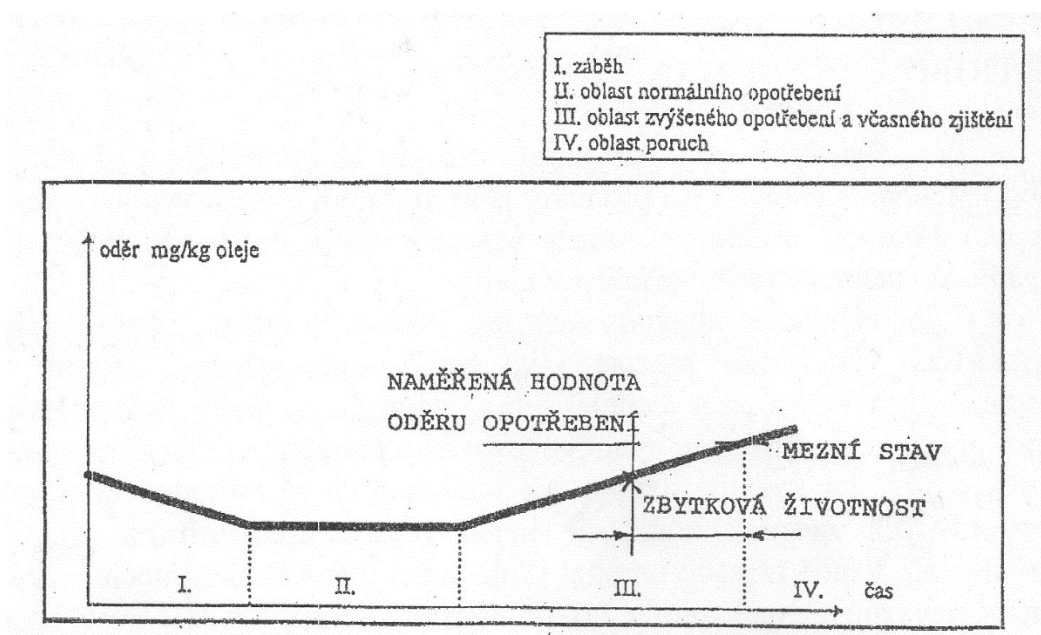
Změna kvality sledovaného maziva dovoluje určení jeho životnosti a to zjištěním stupně jeho znehodnocení jak produkty tepelně-oxidačních procesů, tak i vnějšími nečistotami. Tato analýza je provedena kombinací naměřených hodnot, a to nejčastěji např. viskozita, bod vzplanutí, kyselost, obsah nečistot atd. Zvýšené množství nečistot v oleji pak může znamenat nejen větší opotřebení mazaných částí, ale může znamenat i poruchu funkce mazací soustavy. Správnou analýzou naměřených hodnot je možné stanovit životnost maziv a optimálně stanovit interval výměny maziv, či stanovit mezní hodnotu pro jejich výměnu. [5]

Tribodiagnostika tedy plní dva hlavní úkoly:

- a) sledování stavu opotřebení strojních zařízení

## b) sledování degradace maziva

Degradační forma vzniku poruchy dává možnost určit tzv. zbytkovou životnost, tj. čas do nutné opravy a to jak v bodové, tak v intervalové podobě. Pro znázornění obecného průběhu opotřebení se sbírají nejčastěji data o počtu a velikosti otěrových částic v závislosti na čase. Tato křivka je pak nazývána Vanová křivka viz obrázek 6. [5]



Obrázek 6 Obecný průběh poškození vlivem opotřebení [5]

### 2.2.1 Znehodnocení motorových olejů

Tribodiagnostické metody umožňují vyhodnotit znečištění olejů mechanickými nečistotami, zplodinami termooxidačních procesů, či jiných nečistot. Zdroje nečistot tak mohou být různého charakteru. Zvýšený obsah nečistot v oleji vede ke zvýšení opotřebení mazaných prvků v systému, tvorbě úsad a kalů a v neposlední řadě k ucpání olejových čističů a změnám v dodávkách maziva do olejového systému. Důsledkem těchto změn v kvalitě oleje může vzniknout porucha motoru. Motorový olej bývá znečištěn převážně měkkými nečistotami, které projdou palivem, vodou i čističi a úzce souvisí se stárnutím oleje. Ohledně špatného užívání motoru je možno napovědět přítomnost vody nebo paliva v oleji, může to být ale i důsledkem špatného technického stavu. [5,16]

## **Druhy znečištění:**

### **Tvrdé částice**

Způsobují abrazivní opotřebení a vznik submikrometrických částic. Jsou to např. kovy, prach, brusivo atd. Tvrdé nečistoty nemají na kvalitu motorového oleje takový vliv v důsledku schopnosti čističe zachytávat částice větší než 10  $\mu\text{m}$ . [18,19]

Nejčastějším zdrojem mechanických nečistot bývá nasávaný vzduch. Ten obsahuje i prachové částice, které jsou nasávány do spalovacího traktu. Dalším zdrojem nečistot může být palivo, které také obsahuje prachové částice nebo jiné pevné látky. Otěrové částice kovů jsou dalším zdrojem, vznikají třením dvou kovových povrchů, kterých je ve spalovacím motoru několik. I samotný olej je zdrojem pevných částic. Karbonové úsady tu vznikají po určité době při oxidační a termické degradaci oleje. [16]

### **Měkké částice**

Jsou to oxidační produkty a produkty vzniklé z reakce aditiv. Vzniká tak lepivá, až pryskyřičná hmota. [18]

### **Voda**

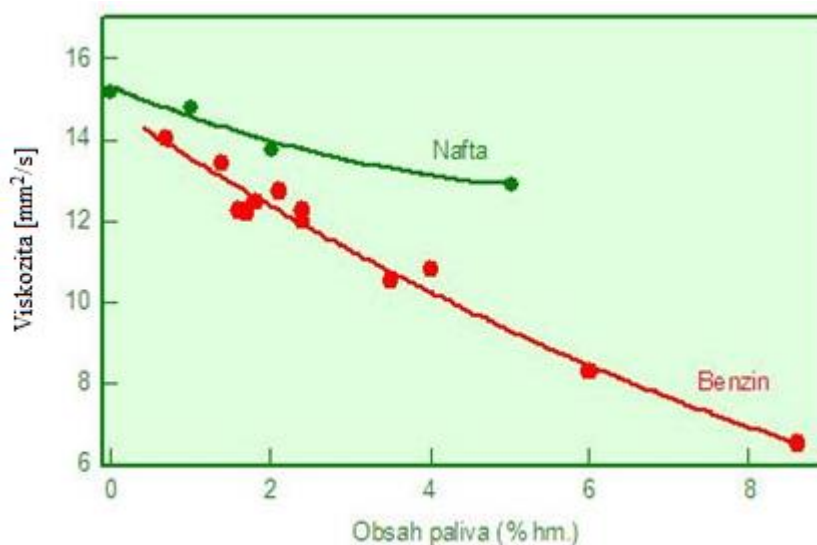
Voda přítomná v oleji, a to jak v hydraulickém nebo v mazacím, způsobuje hned několik nepříjemností. Způsobuje totiž nebo podporuje:

- korozi součástí,
- vypadávání aditiv,
- pění oleje,
- zvyšování viskozity,
- snižování oxidační stability oleje,
- tvorbu kalů,
- tvorbu emulze. [5]

Jak bylo popsáno výše, voda urychluje oxidaci oleje a následný pokles pH oleje. V oleji je rozpustná jen ve velmi malém až zanedbatelném množství. Při překročení určitého množství se voda začíná usazovat na dně olejové vany či nádrže. Pokud je ale olej intenzivněji promícháván, tak vzniká světle hnědá emulze. Zvýšená koncentrace vody bývá dána netěsností motoru, ale hlavně kondenzací vody na stěnách válců při častém spouštění. Vody v oleji je možno se zbavit jen delším provozem motoru při provozní teplotě, kdy se voda začne samovolně odpařovat. Letecké motory většinou pracují při provozní teplotě dostatečně dlouho a obsah vody v oleji oproti automobilovým olejům je minimální.[16,18,19]

## Palivo

Přítomnost paliva je důsledkem netěsnosti spalovacího prostoru. Zbytky paliva v motorovém oleji způsobují snížení viskozity, které se však mnohdy subjektivně nepozná, protože pevné částice a kaly naopak olej zahušťují. Pokud je motor provozován při provozní teplotě, tak se podobně jako u přítomnosti vody v oleji jeho větší část odpaří. Vzhledem k provozní teplotě oleje ale stále zůstávají střední a těžké složky paliva. Nejnebezpečnější je nafta, protože benzín se po zahřátí motoru a prohřátí oleje odpařuje, kdežto nafta v oleji zůstává. Maximální dovolený procentuální podíl paliva v oleji se kvůli mazacím vlastnostem oleje musí dodržet a je udáván výrobcem motoru. Závislost viskozity oleje na obsahu těkavých složek je znázorněna na obrázku 7. [15,19].



**Obrázek 7** Vliv obsahu paliva na viskozitu oleje [15,19]



## Vzduch

Vzduch je přítomen v motorovém prostoru neustále a též přispívá k chemické změně motorového oleje. Reakce kyslíku s molekulami oleje způsobuje oxidaci. Kyslík se tak naváže na molekuly a mění jeho vlastnosti. Se zvětšující se teplotou oleje dochází i k jeho rychlejší oxidaci. Tento jev bývá často nazýván jako termooxidační stárnutí oleje.

Při oxidaci uhlovodíků olejové náplně vzniká několik oxidačních produktů (kyseliny, estery, ketony atd.). Tyto látky sice většinou zlepšují pevnost mazacího filmu a mazivost oleje, avšak snižují množství syntetických protioděrových a mazacích přísad v oleji. Dalším negativním jevem je přítomnost kyselin, které zvyšují kyselost oleje a korozivní vlastnost oleje v motoru. Po nahromadění oxidačních produktů a přesycení oleje může docházet ke zvyšování viskozity. Vznikají i karbonové úsady, které též negativně ovlivňují vlastnosti maziva.[17]

### **2.2.2 Tribodiagnostické metody**

Tribodiagnostika dokáže svými výsledky určovat, či alespoň napomáhat k objektivnímu posouzení jak samotného maziva, tak i strojního zařízení (v našem případě spalovacího motoru). Proto budou i metody tribodiagnostické analýzy rozděleny do dvou skupin.

#### 1) Metody pro posouzení stavu strojního zařízení

- Koncentrace otěrových kovů
  - atomová spektrofotometrie,
  - atomová emisní spektrofotometrie,
  - atomová absorpční spektrofotometrie,
  - polarografie a voltametrie,
  - metoda RAMO.
  
- Hodnocení morfologie a distribučního rozdělení kovů
  - částicová analýza neboli ferografie

## 2) Metody pro sledování degradace maziva

Při zkoumání samotného maziva mluvíme o zhodnocení jeho fyzikálně chemických parametrech. K tomuto zkoumání je používáno spektrální analýzy a několika testů s cílem vyhodnotit následující parametry maziva.

- kinematická viskozita,
- bod vzplanutí,
- obsah vody,
- alkalita a kyselost,
- karbonizační zbytek,
- kapková zkouška,
- celkové znečištění,
- mechanické nečistoty.

### ✓ Kinematická viskozita

Viskozita obecně je rozhodující vlastností maziva v oblasti hydrodynamického tření a je tak hlavním zkušebním údajem mazacích olejů. Viskozita oleje by se během provozu neměla změnit o více jak 20 %. Výsledek je odvozován z grafických závislostí a přibližně určuje možnost dalšího použití oleje v provozu. [5]

Kinematická viskozita se stanovuje kapilárními viskozimetry (např. typu Ubbelohde, Cannon-Fenske-Opag, Ponskevič, Kossler apod.). Měří se čas  $t$ , za který proteče kapilárou definovaný objem kapaliny. Čas  $t$  [s] se vynásobí konstantou viskozimetru  $K$  [ $mm^2 \cdot s^{-2}$ ] (konstanta vyjadřuje geometrické charakteristiky přístroje udávané výrobcem. [9])

$$\nu = K \cdot t \quad (4)$$

$\nu$  ... kinematická viskozita [ $mm^2/s$ ]

$K$  ... konstanta viskozimetru [ $mm^2 \cdot s^{-2}$ ]

$t$  ... čas [s]

## ✓ Bod vzplanutí

U většiny čistých maziv bývá tato hodnota důležitým bezpečnostním, ale i jakostním ukazatelem. U olejů opotřebovaných pak slouží pokles této hodnoty ke stanovení přibližného obsahu zředujících a hořlavých látek. Definice bodu vzplanutí je uvedena v kapitole **2.1.3. Základní vlastnosti olejů.**

Stanovení bodu vzplanutí by se neměla provádět na potenciálně nestabilních, rozložitelných nebo výbušných materiálech, pokud nebylo předběžně prokázáno, že zahřívání stanoveného množství takových materiálů ve styku s kovovými součástmi přístroje v teplotním rozsahu požadovaném pro metodu nebude způsobovat rozklad, výbuch nebo jiné nežádoucí vlivy.[35]

Ke zkoušce je běžně třeba asi 100 ml oleje. U čistých olejů závisí teplota bodu vzplanutí na jejich frakčním složení a obsahu nejtěkavějších podílů. Zkouška je prováděna v kelímku, a to na místě, kde není vzorek ovlivňován vzdušným prouděním a je dostatečně tmavé, aby byl okamžik bodu vzplanutí dobře viditelný. U motorových olejů se tato hodnota pohybuje v rozmezí teplot od 190°C do 235°C (zážehové motory). Dnes už jsou v popředí automatické přístroje, které samy zaznamenají hodnotu bodu vzplanutí a zobrazí ji na displeji. Znalost tohoto bodu je důležitá hlavně pro stanovení množství paliva v oleji. To se ale dá zjistit i například plynovou chromatografií, která bývá pro tyto účely i daleko přesnější. [5]

Metoda měření bodu vzplanutí v otevřeném kelímku se používá převážně pro vzorky s bodem vzplanutí nad 100°C. Je také třeba vzít v úvahu, že teploty bodu vzplanutí bývají o 5- 20°C vyšší než teploty bodu vzplanutí stanovené metodou v uzavřeném kelímku.

Podstata této zkoušky spočívá v zahřívání vzorku zkoumaného oleje v otevřeném kelímku předepsanou rychlostí ohřevu, až do prvního vzplanutí par vzorku nad hladinou po přiblížení zkušebního plamínku, který se pohybuje v pravidelných intervalech nad jejím povrchem. Pokud páry vzorku hoří alespoň 5s, je nazýván tento stav bodem hoření.

Metoda měření bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku podle Penskyho-Martense ČSN EN ISO 2719 se používá převážně pro vzorky s bodem vzplanutí pod 100°C a měření je popsáno v kapitole **3.5 Metodika měření bodu vzplanutí podle Penskyho-Martense.**

## Výpočet

- Bod vzplanutí vztažený na standardní podmínky se vypočítá pomocí rovnice:

$$T_c = T_o + 0,25 \cdot (101,3 - p) \quad (5)$$

*T<sub>c</sub>... bod vzplanutí korigovaný na standardní atmosférický tlak 101,3 kPa [kPa]*

*T<sub>o</sub>... bod vzplanutí při atmosférickém tlaku okolí [°C]*

*p... atmosférický tlak okolí [kPa]*

Bod vzplanutí korigovaný na standardní atmosférický tlak je uveden v °C zaokrouhlený na celé číslo.

### ✓ **Obsah vody**

Většina analýz s cílem získání hodnoty o obsahu vody v oleji jsou prováděna ve dvou etapách. První etapa zahrnuje kvalitativní zjištění vody pomocí některé z nejjednodušších metod, jako např. zahřátí malého množství oleje na rozpálené kovové podložce. Praskavý zvuk při zahřívání bývá příčinou výskytu vody a je porovnáván s připravenými standardy. Poté se většinou vzorek zkoumá kvantitativně pomocí některé z laboratorních metod. Tribodiagnostická analýza nabízí Fischerovu titrační metodu, popřípadě stanovení vody coulometricky. Coulometrické vyhodnocení vody přítomné v oleji je popsáno v kapitole **3.4 Metodika měření obsahu vody přístrojem Coulometer WTD.** [5]

Výhodou coulometrických titrací je převedení odměřovaného množství na měření proudu, které je velmi přesné i v malých kvantech. Lze tak využít možnost stanovení velmi nízkých koncentrací i v relativně malých objemech titrační nádoby.

Coulometrické vyhodnocení je jednou z nejuhodnějších metod elektrochemické analýzy. Množství stanovované látky se zde převádí na měření proudu. Množství stanovované látky je vypočteno z prošlého náboje potřebného k úplnému průběhu příslušné reakce. Podle Faradayových zákonů je hmotnost *m* stanovované látky [g] přímo úměrná prošlému elektrickému náboji podle vztahu (6): [30]

$$m = \frac{QM}{zF} \quad (6)$$

*m... hmotnost stanovované látky [g]*

*Q... náboj [C] definován jako integrál prošlého proudu  $I$  [A] v čase  $t$  [s]*

*z... počet vyměňovaných elektronů při elektrodové reakci*

*F... Faradayova konstanta [ $F = 96\,485$  C/mol]*

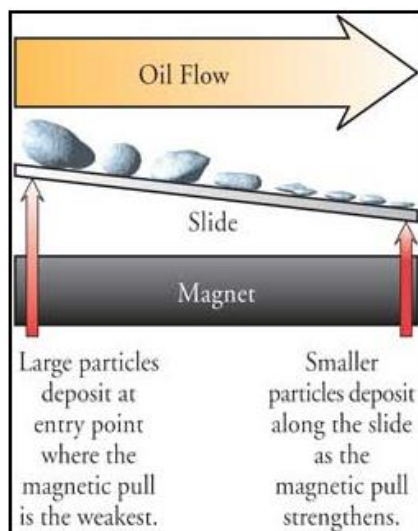
*M.... molární hmotnost látky [g/mol]*

### ✓ Ferografie

Název ferografie pochází z latinského slova *ferrum* přeložený do českého jazyka jako kov. Ferografie vznikla v 70. letech a primárně byla určena při svém vzniku k průběžné analýze maziv leteckých motorů. Je založena na principu oddělování pevných cizorodých částic obsažených v olejové náplni mazacích soustav strojů a zařízení od vlastního zkoumaného oleje. Dále dokáže popsat zachycené částice a přiřazuje je k jednotlivým druhům opotřebení podle jejich velikosti a tvaru. Dokáže tak předpovědět blížící se poruchu stroje. [21,22,23]

Princip činnosti je celkem jednoduchý. Zkoumaný vzorek oleje se přivede na šikmou destičku v nehomogenním magnetickém poli. Podle proměnné magnetické síly se oddělují rozdílně veliké feromagnetické částice. Po ukončení přivádění oleje se pod mikroskopem zkoumají usazené částice. Dnešní ferografy tuto analýzu provádějí zcela automaticky.

Podrobný popis měření proveden v kapitole **3.6 Metodika měření na ferografu Spectro T<sup>2</sup>FM Q<sup>500</sup>**.



**Obrázek 8 Princip ferografu [23]**

## 1. Přímočtená ferografie (Direct Reading Ferrography, DR-F)

Tato metoda dává možnost rychlého odhadu množství feromagnetických slitin kovů vyskytujících se ve vzorku oleje. Je zde využito sedimentace částic při průtoku zkoumaného vzorku oleje v silném nehomogenním magnetickém poli. Částice se zde dělí podle velikosti do dvou skupin:

- malé částice  $D_S$  – částice menší než  $5 \mu\text{m}$ , které odpovídají běžnému adhezivnímu opotřebení
- velké částice  $D_L$  - částice větší než  $15 \mu\text{m}$ , kde jejich nárůst četnosti je varovným příznakem blížící se poruchy dílů motoru.

Těsně před poruchou stroje (tj. ložiska, ozubená kola atd.) prudce roste četnost výskytu velkých otěrových částic. Vzniká pak důležitá charakteristika v podobě indikátoru poměru počtu velkých částic k malým tzv. *WSI* (index významnosti opotřebení – Wear Severity Index). Růst *WSI* je znakem abnormálně urychleného opotřebení třecích dvojic.[9]

$$WSI = (D_L + D_S).(D_L - D_S) = D_L^2 - D_S^2 \quad (7)$$

*WSI*... indikátor poměru počtu velkých částic k malým [-]

$D_S$ ... malé částice [-]

$D_L$ ... velké částice [-]

## 2. Analytická ferografie (Analytical Ferrography, AF)

AF navazuje plynule na DR-F. Jednotlivé částice jsou zde mikroskopicky vyhodnocovány. Vypovídá tak o skutečném technickém stavu mazací soustavy a mazaných dílů. V neposlední řadě i o způsobu opotřebení jednotlivých třecích dvojic.[9]

Morfologie je závislá na druhu tření a je nám předáno specifických informací o povrchových vrstvách jednotlivých částí strojního zařízení. Tvar jednotlivých částic umožňuje stanovit druh opotřebení vyskytující se v kluzných dvojicích. [5]

a) Částice abrazivního otěru

Dlouhý lineární rozměr s malou tloušťkou. Délka může dosahovat až stovek mikrometrů. Tloušťka se pohybuje v desetinách mikrometrů.

b) Částice adhezivního otěru

Šupinky vločkovitého tvaru. Jsou to tzv. jednorozměrné částice, tzn., že šířka a délka se příliš neliší a pohybuje se okolo 5-15  $\mu\text{m}$ . Tloušťka dosahuje nízkých hodnot, jen okolo 0,25- 0,75  $\mu\text{m}$ . Pokud velikost těchto částic nepřesáhne 15  $\mu\text{m}$  a pokrývají větší část stopy zkoumaného vzorku oleje, je stav opotřebení uspokojivý.

c) Částice únavového opotřebení

Únavové opotřebení je typickým představitelem pro převodové systémy. Částice mají trojrozměrný tvar. Délka, šířka i hloubka těchto částic je nepříliš rozdílná. Povrch vykazuje řadu nerovností a rýhování. [5]

✓ **Analýza částic laserovým analyzátozem**

Laserový analyzátor částic je moderní metodou při analýze opotřebovaných olejů. Umožňuje klasifikaci tvarů a stanovení počtu částic nacházejících se v mazacích olejích. Vyhodnocení je zprostředkováno pomocí vhodného softwaru a následné morfologické analýzy a analýzy rozdělení velikosti částic opotřebení. Hodnotí se největší rozměr částice a průměr ekvivalentního kruhu, což je průměr kruhu, který má stejnou plochu jako je plocha částice. [9]

Měření probíhalo na laserovém analyzátoru částic LaserNet Fines®-C a princip jeho funkce a popis měření je podrobně popsán v kapitole **3.3 Metodika analýzy částic laserovým analyzátozem LaserNet Fines®-C**.

✓ **Podíl těkavých látek**

Palivo obsažené v oleji představuje veliký problém. Jeho diagnostika je ovšem velice podhodnocena a v běžné údržbě se tomuto problému nevěnuje přílišná pozornost. U drahých strojů popř. spalovacích motorů používaných v letectví je průběžná kontrola množství těkavých látek v oleji běžnou praxí. Je to samozřejmě způsobeno hlavně nutností zvýšené bezpečnosti a spolehlivosti v provozu. V automobilovém průmyslu se tato technická diagnostika provádí

většinou, až když nastanou nějaké problémy. Diagnostických metod pro stanovení obsahu těkavých

látek v oleji je několik. Nejspolehlivější a nejpřesnější metodou je plynová chromatografie. Další metodou je zjištění množství těkavých látek přímo z výparů viz kapitola **3.2 Metodika měření podílu paliva v oleji přístrojem Fuel Sniffer**.

Dalším méně přesným, avšak nejstarším a nejběžnějším způsobem a velmi jednoduchým je zjištění množství těkavých látek po přepočtu z hodnoty bodu vzplanutí, tzn. zapálení uvolňovaných par ze vzorku, který se při testu pomalu zahřívá.



### 3. Cíl a metodika práce

Cílem diplomové práce je provedení analýz motorových olejů ve vybraných letounech. Na základě této analýzy poté zhodnotit a doporučit korekce v údržbě měřených leteckých motorů. Samotný odběr vzorků by měl probíhat na základě určitých, předepsaných a doporučených postupů, tak aby byla zajištěna správnost odebraného vzorku a nedocházelo tak ke zkreslujícím informacím.

K praktické části diplomové práce, tedy samotným analýzám vzorků bude připojena i literární rešerše. Ta by měla nastínit jak konstrukci mazacího systému letadla, tak i obecné vlastnosti motorových olejů. V literární rešerši nechybí ani charakteristika tribodiagnostiky a jednotlivých tribodiagnostických analýz. V následujících hodnotách jsou zahrnuty základní informace o zkoumaných motorech včetně informací o letounech, ze kterých byly vzorky odebírány. Přesněji se tak jednalo o dlouhodobé sledování olejové náplně u ultralehkého letadla ATEC 122 ZEPHYR imatrikulace OK-HUG 09 viz obrázek 10, dále pak u letadla typu CESSNA 150 spadajícího do vyšší váhové kategorie, a tedy už vedeným pod Úřadem civilního letectví, imatrikulace OK-FOR viz obrázek 9.



Letadlo	Cessna 150
Rozpětí křídel	10,11 m
Délka	7,29 m
Výška	2,39 m
Hmotnost prázdného letadla	440 kg
Max. vzletová hmotnost	725 kg
Motor	Continental O-200-A
Počet hodin do generální opravy (TBO)	1800 hod
Výkon	100 hrs
Objem olejové náplně	5,6 l

*Obrázek 9 Technická data Cessna 150 [6]*



Letadlo	Atec 122 Zephyr
Rozpětí křídel	9,4 m
Výška	2,0 m
Prázdná hmotnost	292 kg
Max. vzletová hmotnost	450 kg
Motor	Rotax 912 UL
Výkon	80 hrs
Objem olejové náplně	3 l

*Obrázek 10 Technická data Atec 122 Zephyr*

Podrobnější technické informace o motoru Continental O-200-A pohánějící letadlo Cessna 150 jsou dostupné v příloze 2, technická data motoru Rotax 912 UL poté v přílohách 3 a 4.

Pro analyzování vzorků motorového oleje bylo zvoleno celkem šest tribodiagnostických metod. Byly vybrány s ohledem na velikost, tj. množství vzorku motorového oleje v ml a také jako nejvhodnější diagnostický signál o stavu motoru.

- 1. Viskozita**
- 2. Obsah těkavých látek**
- 3. Částicová analýza (LaserNet Fines®-C)**
- 4. Obsah vody**
- 5. Bod vzplanutí**
- 6. Ferografie**

### 3.1 Metodika měření viskozity přístrojem SVM 3000

Měření viskozity bylo provedeno na přístroji Anton Paar SVM 3000. Měření probíhalo při dvou teplotách podle normy, a to při 40°C a 100°C. Anton Paar SVM 3000 je rotační viskozimetr s cylindrickou geometrií založený na modifikovaném principu Couette s rychle rotující vnější trubicí a vnitřním měřicím tělískem rotujícím pomaleji. Z pouhých 2,5 ml vzorku lze stanovit dynamickou viskozitu, kinematickou viskozitu a hustotu např. mazacích a transformátorových olejů, ropy, topného oleje nebo vazelíny.

SVM 3000 slouží k měření dynamické viskozity [mPa.s] a hustoty vzorku. Z těchto hodnot současně vypočítává kinematickou viskozitu [mm<sup>2</sup>/s]. Dynamická viskozita je základním parametrem pro vyhodnocení mazacích schopností látek.

Měření viskozity na tomto přístroji je založeno na principu měření torze a viskozity. Rotující magnet generuje vířivé elektrické pole s přesnou závislostí brzděné torze. Vířivé brzděné pole je měřeno s vysokou přesností. Součástí je i termoelektrický termostat, který poskytuje velmi přesné výsledky. Rozlišení při měření napětí je pouhých 50 pico Nm. Vyžaduje tak pouze velmi přesnou kompaktní měřicí celou. [26]



*Obrázek 11 Viskozimetr SVM 3000 [26]*

#### Postup měření

- Po zapnutí přístroje a provedení autotestu je motor viskozimetru uveden do rychlosti odpovídající nástřiku vzorku do přístroje.
- V nabídce viskozimetru je nastaveno měření v režimu při 40°C, pro následné měření přenastaveno na 100°C
- Pomocí jednorázové stříkačky naplněné vzorkem oleje se pomalu vstříkne tento olej do vstupu plnicího nástavce.
- Přes tlačítko START se uvede motor do chodu.
- Na displeji se změní nápis z „Filling“ na „Mesuring“. Po skončení měření se objeví „Result Valid“. Platnost měření je potvrzována blikajícím znaménkem diamantu.

- Po ukončení měření se odstraní vzorek z cel pomalým nastříkáváním technického benzínu do systému.
- Pro následné vysušení měřících cel se připojí vzduchová hadička do vnějšího plnicího vstupu a přes tlačítko „PUMP“ se do systému dostává stlačený vzduch.

### 3.2 Metodika měření podílu paliva v oleji přístrojem Fuel Sniffer

Dalším bodem v analyzování motorových olejů je měření obsahu těkavých látek. Pro toto měření bylo použito přístroje Spectro FDM Q<sup>600</sup> Fuel Sniffer. Je to přenosný přístroj vyvinutý společně s americkým námořnictvem pro velmi rychlé a přesné měření znečištění oleje palivem. Pro měření této koncentrace využívá Surface Acoustic Wave (SAW) Vapour Microsensor. Na základě Henryho zákona je koncentrace palivové páry přímo vztažena k obsahu paliva v olejovém vzorku. V principu tak čerpadlo umístěné uvnitř přístroje čerpá páry ze vzorku přes SAW sensor, který detekuje absorbované hydrokarbonáty změnou frekvence SAW. Fuel Sniffer dokáže zaznamenat zředění vzorku palivem až do obsahu 10 %. [29]



**Obrázek 12 Fuel Sniffer [28]**

#### Postup měření

- Nádobka s olejem je vložena pod čerpací hlavu přístroje. Manuálně pomocí červené páky se stlačí čerpací hlava s těsněním na nádobku s olejem a hermeticky se tak uzavře nežádáný přívod či nasátí par z okolí.
- Pomocí tlačítka Select je vybrán požadovaný test. Tlačítkem Start je spuštěn samotný test a čerpadlo začne nasávat páry ze vzorku.
- Fuel Sniffer potřebuje k naměření jednoho vzorku jen cca jednu minutu. Poté se na LCD displeji ukáže koncentraci vzorku těkavou látkou.

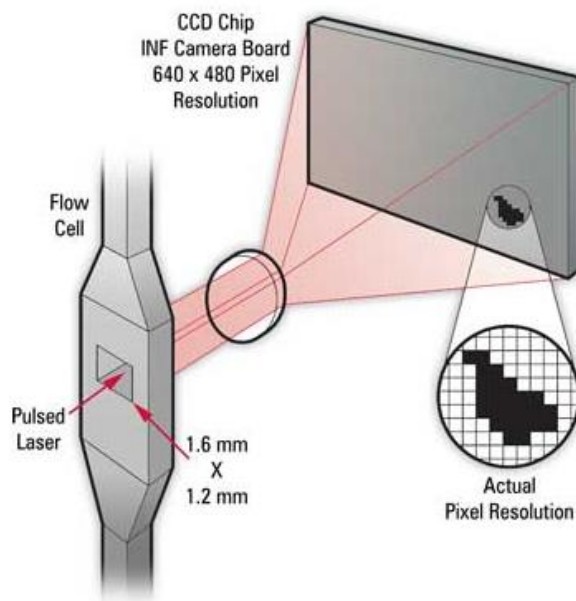
### 3.3 Metodika analýzy částic laserový analyzátořem LaserNet Fines®-C

Laserový analyzátoř částic LaserNet Fines®-C je unikátní analytický přístroj a metoda, která umožňuje jak automatické rozeznávání tvaru částic, tak i jejich počet. Dokáže tak zprostředkovat velmi důležité informace o olejové náplni, které dokážou napovědět, zda se blíží případná porucha podle celkové koncentrace částic, ale zároveň i podle jejich tvaru rozeznat příčinu těchto problémů.

LNF dokáže detekovat částice větší než 4  $\mu\text{m}$ , a to s využitím laserové zobrazovací techniky a softwaru pro zpracování takového obrazu. Pomocí tohoto softwaru je umožněno sledovat i siluety částic, a to od velikosti 20  $\mu\text{m}$ . Přístroj poté vyhodnocuje tvar částic a automaticky je rozřazuje do skupin, zda jsou charakteru abrazivního, adhesivního, únavového, nekovové, vlákna či kapky vody. [25]

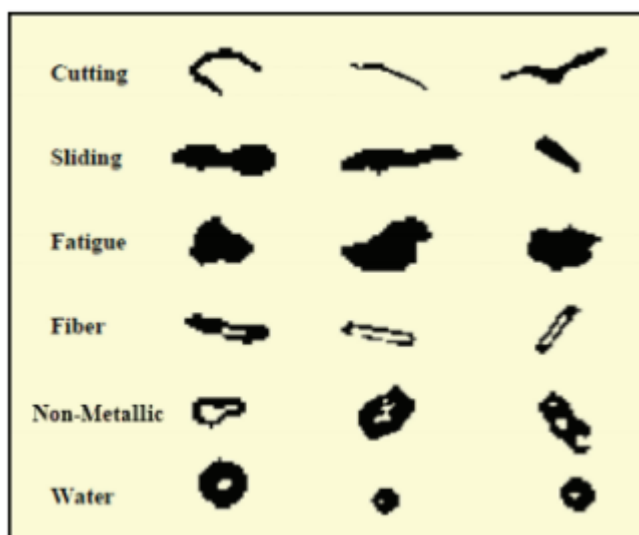
Na obrázku 13 je znázorněn princip funkce LaserNet Fines®-C, který spočívá v zavedení vzorku oleje do systému po jeho důkladné homogenizaci. Vzorek si nasaje samo čerpadlo analyzátořu. Olej je nasáván do patentované zobrazovací cely, která je osvětlována pulzní laserovou diodou, která zastaví pohyb částic. LNF procesy ukládá v tisících obrázcích k získání výsledku s ohledem na statistiku. Koherentní světlo je tak vysíláno skřz kapalinu a zobrazováno přes CCD snímač kamerového systému. Každý výsledný obraz je pak analyzován systémem na jednotlivé částice. [24]

Vyhodnocení počtu částic včetně jejich velikosti je hodnoceno LNF tak, aby tyto výsledky bylo možné zobrazit podle normy ISO 4406:1999, tzv. kódu čistoty (množství částic v kapalině – oleji). Podle normy se kód čistoty dělí na tři hraniční pásma a to  $\geq 4 \mu\text{m}$ ,  $\geq 6 \mu\text{m}$  a  $\geq 14 \mu\text{m}$ . Používá se i jiné členění, např. NAS1638 (5-15  $\mu\text{m}$ , 15-25  $\mu\text{m}$ , 25-50  $\mu\text{m}$ , 50-100  $\mu\text{m}$  a více než 100  $\mu\text{m}$ ), NAVIAR-01-1A-17, SAE AS4059.



**Obrázek 13 Princip funkce LNF [24]**

Jak bylo popsáno výše, tak LaserNet Fines®-C kromě analýzy počtu částic ve vzorku dokáže rozeznat díky své optice i tvar částic a přidělit mu druh opotřebení. Toto třídění probíhá na základě vložení tzv. umělé neuronové sítě do softwaru tohoto přístroje. Ta byla vytvořena odborníky podle dosud zjištěných poznatků z oboru vzniku opotřebení a tvarů jejich částic. LNF tak podle své rozsáhlé knihovny různých tvarů a velikostí částic přiřadí k jednotlivým částicím jejich pravděpodobný vznik. Na obrázku 14 je možno sledovat právě rozdílnost tvaru částic při jednotlivých opotřebeních a podle jakého klíče LNF pracuje. [24]



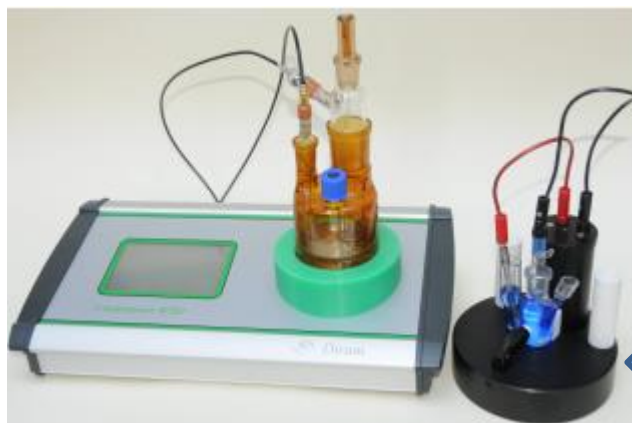
**Obrázek 14 Rozřazovací klíč LNF [25]**

### 3.4 Metodika měření obsahu vody přístrojem Coulometer WTD

Dalším z důležitých diagnostických signálů je obsah vody. Měření je zprostředkováno na přístroji Coulometer WTD. Coulometer WTD je automatický titrátor určený pro rutinní analýzy. Stanovení vody se provádí titrací podle Karl Fischera s coulometrickou generací titračního činidla – jódu. Touto metodou je možné stanovit malá až stopová množství vody v organických kyselinách, alkoholech, éterech, esterech, uhlovodících a dalších organických rozpouštědlech. Analýza vody v olejích se provádí přímo nástřikem do titrační nádoby. [30]

Měřicí souprava viz obrázek 15 se skládá z elektronického přístroje s displejem a skleněné nádoby s titračním roztokem. Do této nádoby je přímo nástřikován zkoumaný vzorek. S jednou náplní nádoby lze provést hned několik měření, avšak max. do hodnoty celkového množství vody asi 0,2 g. Použitelnost roztoku je snižována právě jeho zředěním a změnou jeho vodivosti.

K coulometru je dále možné připojit i modul pro stanovení čísla kyselosti olejů (viz obrázek 15), a jiných ropných produktů.



rozsah měření	1 ppm až 5% H <sub>2</sub> O
chyba měření	< 5 µg do 1 mg H <sub>2</sub> O 0,5 % při 1 mg H <sub>2</sub> O
titrační proud	max. 300 mA
indikační proud	1,6 až 20 µA
navážka vzorku	0,01 až 2 g
zobrazení výsledku	µg, ppm, %
displej / klávesnice	LCD / dotyková

← Přídavný modul KOH

*Obrázek 15 Coulometer WTD [30]*

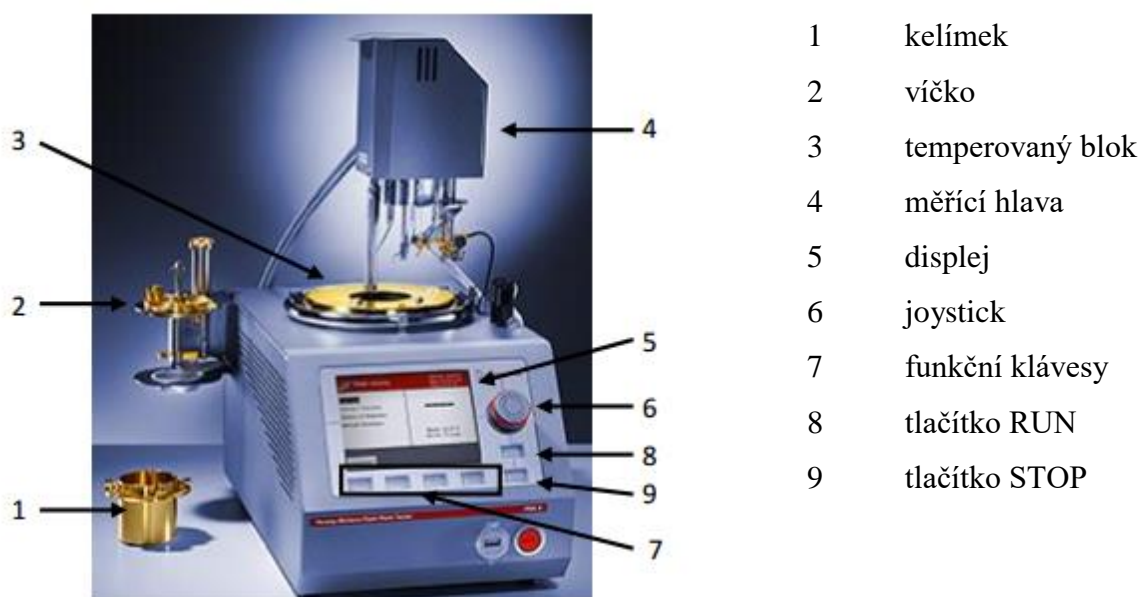
### 3.5 Metodika měření bodu vzplanutí podle Penskyho-Martense

Petrotest PM4 je poloautomatický přístroj určený k měření bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku: Pensky-Martens. Podle uživatelské příručky výrobce se jedná o 1-místný přístroj s elektrickým ohřevem vzorku, elektrickým i plynovým zážehem. Rychlost el. míchání vzorku je přepínatelná: (A) 120 ot./min. - (B) 250 ot./min. Detekce bodu vzplanutí probíhá vizuální

kontrolou, na skleněném teploměru je odečítána hodnota teploty vzorku. Rozsah měření cca +20°C/+350°C (20°C je dosaženo při ochlazení kelímku se vzorkem v lednici).

Vzorek je zahříván v uzavřeném kelímku bez míchání a v pravidelných teplotních intervalech se zavádí do kelímku na 2s zkušební plamínek a je zjišťována nejnižší teplota, při které vzplane a opět zhasne směs par se vzduchem, která se vytváří nad hladinou vzorku.

Metoda měření bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku se používá převážně pro vzorky s bodem vzplanutí pod 100°C.



**Obrázek 16** Přístroj pro stanovení bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku [20]

### Postup měření

- Zkušební kelímek je naplněn po rysku zkoušeným vzorkem oleje a vložen do vyhřívacího bloku přístroje.
- Nasadí se víko a vloží se teploměr.
- Hlavice přístroje se otočí a umístí do měřicí polohy tak, aby silikonová hadička, která slouží jako spojka mezi motorem a míchadlem, dosedla na hřídel míchadla. Zkontroluje se poloha ramínka pro ovládání clony na víčku.
- Po zapnutí přístroje a pomocí otočného ovladače na čelním panelu (heating control) je nastavena v počátečním zahřívání větší rychlost. Před dosažením předpokládané hodnoty bodu vzplanutí je tato rychlost pomocí tohoto ovladače snížena, aby bylo dosaženo



přesnějších výsledků měření a citlivěji tak mohla být zaznamenávána dosažená teplota vzorku.

- Po dosažení určité teploty, v tomto případě asi cca 70°C je ubráno pomocí heating control ovladače na rychlosti zahřívání. Od této chvíle je nutno se zaměřit na žhavič, který je zapnut spínačem RUN. Žhavič se přiblíží malým otvorem ke sledovanému vzorku a sleduje se případné vzplanutí. Pokud dojde při přiblížení žhaviče ke vzplanutí par, hodnota je zapsána a je to právě hledaná hodnota teploty bodu vzplanutí.

### 3.6 Metodika měření na ferografu Spectro T<sup>2</sup>FM Q<sup>500</sup>

Ferografické vyhodnocení oleje bylo provedeno na laboratorním ferografu Spectro T<sup>2</sup>FM Q<sup>500</sup> s bichromatickým mikroskopem. Mikroskop je přes USB konektor připojen k PC a obraz je převeden pomocí kamery do softwaru Lambdasoft 2007.

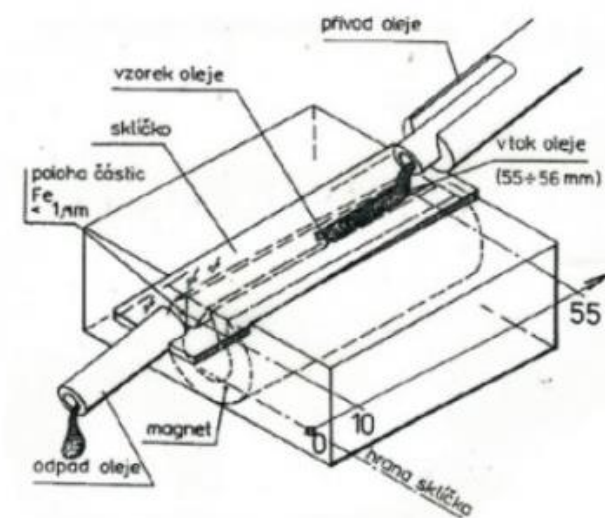


**Obrázek 17 Spectro T2FM Q500 a bichromatický mikroskop [31]**

Hlavním konstrukčním prvkem ferografu je skleněná trubice „sosákovitého“ typu pro tvorbu ferogramu. Tato trubice umožňuje konstantní a efektivní průtok vzorku oleje. Vzorek putuje na ferogram pouze vlastním spádem, a je tak eliminováno možné deformace částic při průtoku přes čerpadlo.

Nejdůležitějším krokem při měření na ferografu je samotná příprava vzorku. Vzorek musí být dostatečně zhomogenizovaný, aby se všechny částice, které jsou usazeny na dně

vzorku dostatečně rozptýlili po celém objemu vzorku. Olej pak musí být ještě naředěn technickým benzínem. Pomocí stříkačky je vzorek přiveden do nálevky trubice a vzorek pomalu stéká až na sklíčko, kde se začíná tvořit ferogram. Po přivedení celého vzorku oleje na ferogram začíná cyklus proplachu. Technický benzín je přiveden pomocí injekční stříkačky na okraj trubice a postupným vykapáváním se trubice pročistí a posléze čistí stopu ferogramu od přebytečného oleje. Proplach nesmí být uspěchán, aby nedošlo k odplavení části ferografické stopy. Takto vyčištěná a vysušená stopa na transparentní podložce se vyhodnocuje pomocí bichromatického mikroskopu. Tento mikroskop je konfigurován speciálně pro zkoušku ferogramů s oběma odrážejícími a procházejícími světelnými zdroji umožňujícími osvětlení stojanu mikroskopu z obou stran. Použit je zde zelený filtr v cestě procházejícího světla a červený filtr, v cestě odrážejícího světla. Nekovové částice se tak s procházejícím světlem jeví zeleně a kovové částice v odrážejícím světle červeně. Obraz je přes kamerový systém přenesen do programu Lambdasoft 2007, kde dochází k samotné vizuální analýze s možností využití dalších přídatných prvků programu, jako např. měření velikosti jednotlivých částic.



**Obrázek 18 Princip vzniku ferografické stopy [32]**

### 3.7 Metodika odběru vzorků oleje

Metodika odběru jednotlivých vzorků by se měla opírat o normu ČSN 65 6207 – odběr vzorků hydraulických kapalin. Tato norma stanovuje několik zásad pro správný odběr. Zařízení musí být minimálně 20 minut v provozu z důvodu dokonalého promíchání a ohřátí oleje na provozní teplotu. Odebraný vzorek by měl být o objemu 200-250 ml ve 300 ml čisté

vzorkovnici. Popis vzorku musí být přesný, čitelný a musí obsahovat údaje jako číslo a název stroje, mazané místo, druh maziva, datum odběru, kdo vzorek odebral a označení požadovaných rozborů. Dále bude během odběru dodržena pracovní teplota motoru min. 65 °C a max. 15 min po zastavení motoru. Odběr bude prováděn pomocí vhodného přípravku a to otvorem pro kontrolní měrku olejové náplně. Po odběru bude vzorek náležitě zabezpečen proti okolním vlivům a možným následným zkreslujícím výsledkům. V případě odběru vzorků pro účely této diplomové práce bylo upraveno množství vzorku na cca 60 ml. Na provedení všech tribodiagnostických měření toto množství stačí. Odebrání prvního vzorku z olejové náplně bylo započato dne 16.7.2015 a poslední vzorek byl odebrán 29.10.2015. U letounu ATEC 122 ZEPHYR tak bylo monitorováno téměř 200 mth s odebíráním jednotlivých vzorků oleje Aeroshell OIL SPORT PLUS 4 (vlastnosti oleje viz příloha 6) po zhruba 10 mth.

Výměnný interval pro olejovou náplň je nastaven na 100 mth. U letadla typu Cessna 150 byl dodržen interval odběru oleje Aeroshell oil W 15W-50 (vlastnosti oleje viz příloha 5) po 10 letových hodinách. U těchto letadel je nastaven výměnný interval motorového oleje na hodnotu 50 letových hodin. [5]

Obrázek 19 představuje identifikační štítek vedený pro každý odebraný vzorek motorového oleje.

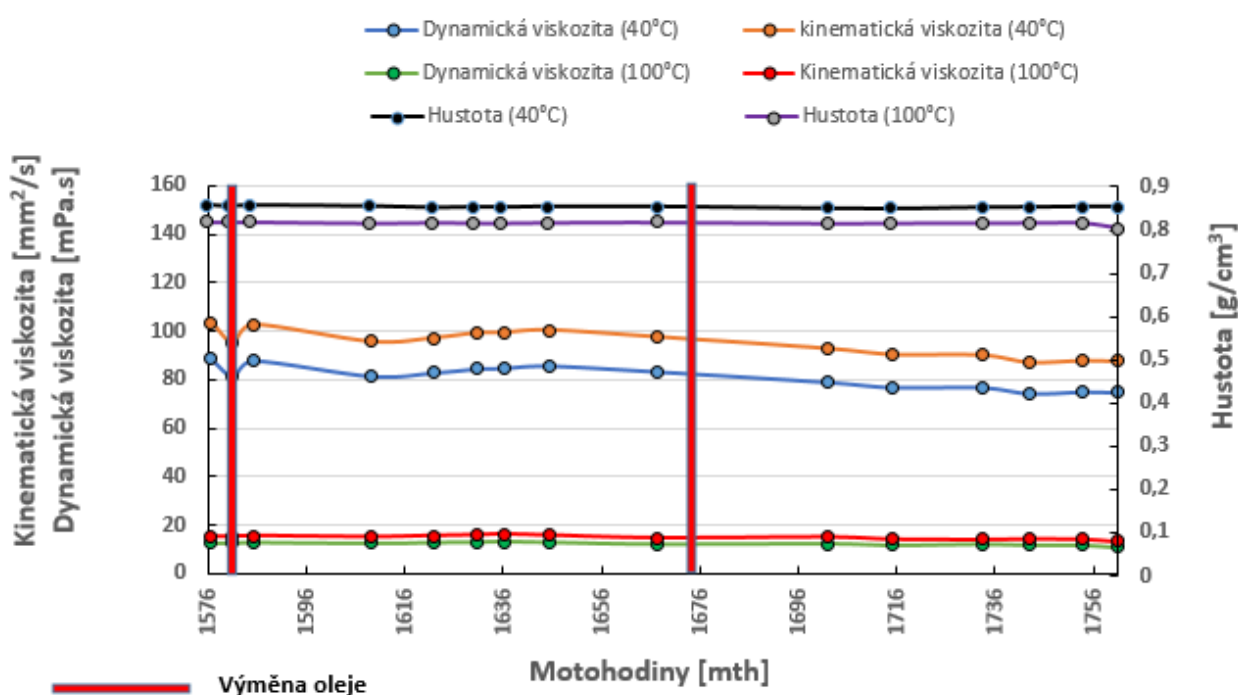
<b>Stroj</b>	<b>C150</b>
<b>Imatrikulace</b>	<b>OK-FOR</b>
<b>Motor</b>	<b>Continental O-200-A</b>
<b>Datum odběru</b>	<b>16.7.2015</b>
<b>Motohodiny</b>	<b>-</b>
<b>Letové hodiny</b>	<b>5869h 58min</b>
<b>Odebral</b>	<b>J.VESELÝ</b>

*Obrázek 19 Příklad konkrétního odběrného štítku*

## 4. Výsledky

### 4.1 Výsledky stanovení viskozity a hustoty přístrojem SVM 3000

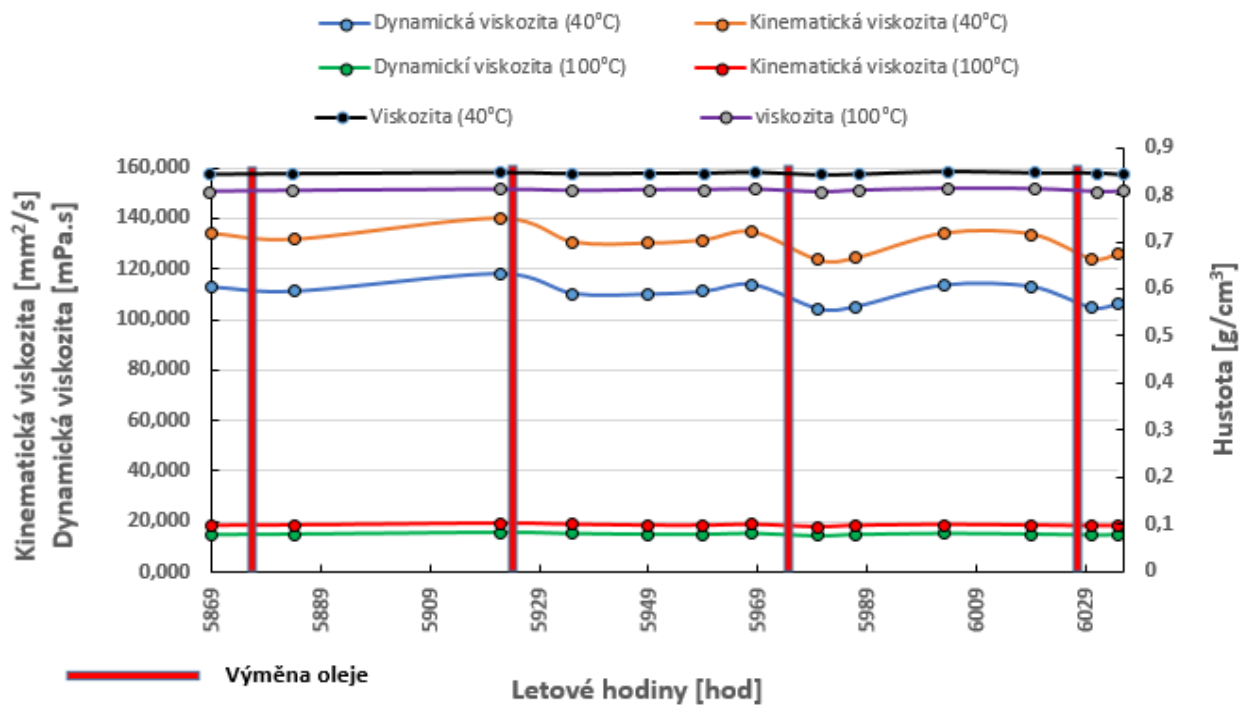
Výsledné hodnoty kinematické a dynamické viskozity včetně hustoty vzorků oleje Aeroshell OIL SPORT PLUS 4 jsou zobrazeny níže, viz obrázek 20. Zde je vynesena závislost zkoumaných veličin na době provozu, resp. motohodinách motoru ROTAX 912 UL letadla ATEC 122 ZEPHYR.



**Obrázek 20** Kinematická, dynamická viskozita a hustota oleje Aeroshell OILSPORT PLUS 4 v závislosti na motohodinách [autor]

Z obrázku 20 je patrné, že hustota oleje byla po celou dobu zkoumání téměř konstantní. Po celou dobu se hustota pohybovala pro 40 °C okolo hodnoty  $0,85 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ , a pro měření hustoty při 100 °C okolo hodnoty  $0,81 \pm 0,015 \text{ g/cm}^3$ .

Při hodnocení kinematické a dynamické viskozity lze pozorovat mírně snižující se hodnoty po celou dobu provozu. Markantnější rozdíl v hodnotách viskozity pro měření při 40 °C lze nalézt jen po výměně olejové náplně při 1580 mth. Obě viskozity naměřené při 100°C nevykazují žádný výkyv v hodnotách a po celou dobu jsou téměř konstantní. Při porovnání hustoty a viskozity s hodnotami udávanými výrobcem tak není shledána žádná anomálie a po dobu provozu se všechny hodnoty výrazně nelišily od hodnot předepsaných.



**Obrázek 21** Kinematická, dynamická viskozita a hustota oleje Aeroshell oil W 15W-50 v závislosti na letových hodinách [autor]

Na obrázku 21 je znázorněn průběh měřených veličin jako kinematická a dynamická viskozita včetně hustoty vzorku v závislosti na letových hodinách pro letoun C150 imatrikulace OK-FOR. Zde se jedná o olej Aeroshell oil W 15W-50. Kinematická a dynamická viskozita naměřená při 40 °C vykazuje znatelnější výkyvy a lze je přisoudit dolévání oleje během provozu v důsledku jeho ztrát při provozu. Během měření při 100 °C už ale výkyvy v hodnotách nejsou zaznamenány. Velmi přesně jsou i následovány hodnoty viskozity udávané výrobcem oleje.

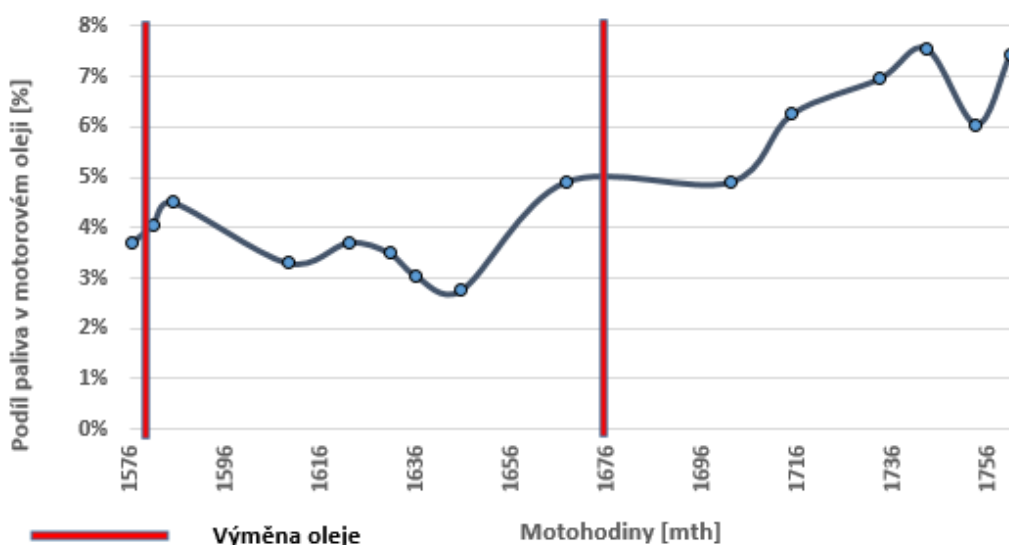
Hustota oleje je zde také velmi stabilní a velmi mírné zvýšení se zde koná až po cca 6000 letové hodině. Zde ale docházelo i k nestabilitě kinematické a dynamické viskozity, což je možno přisoudit, jak už bylo popsáno výše, nějakému provozního důvodu, jako jsou např. náročnější lety z hlediska jeho zvýšené obratovosti, lety s nestabilním výkonem motoru atd., z čehož poté vznikají zvýšené olejové ztráty v mazacím systému.

## 4.2 Výsledky stanovení procentního podílu paliva na přístroji Fuel Sniffer

Dalším měřením v analýze motorových olejů bylo měření podílu těkavých látek ve zkoumaném vzorku oleje. Bylo tak provedeno pomocí přístroje Fuel Sniffer Spectro FDM Q<sup>600</sup>. Pro tuto metodu, oproti využití klasické hodnoty bodu vzplanutí pomocí přístroje Pensky Martens PM-4, bylo rozhodnuto hlavně díky její veliké jednoduchosti a množství potřebného

vzorku oleje pro provedení této analýzy. Jedinou nevýhodou se zde jeví jen měřící rozsah přístroje od 0-10 % podílu paliva v oleji. Pro měření ale tento rozsah plně dostačuje. Pro větší statistickou přesnost a kontrolu bylo provedeno měření u každého vzorku několikrát. Samotné měření trvá max. do dvou minut, a lze tak naměřit až 30 vzorků za hodinu.

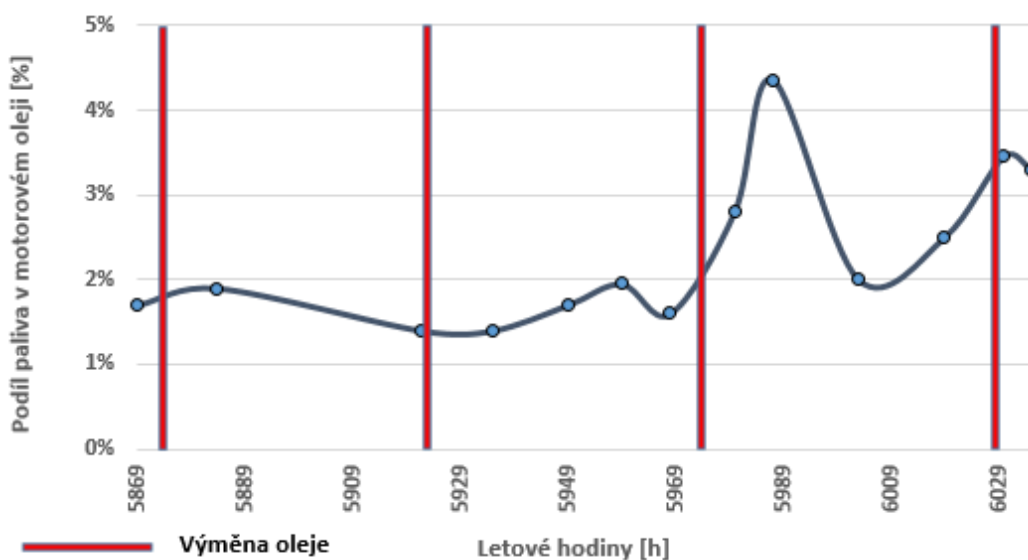
Na obrázku 22 níže je znázorněna závislost právě podílu těkavých látek (v tomto případě paliva) na počtu motohodin motoru ROTAX 912 UL. Naměřené hodnoty do 5 % podílu paliva v motorovém oleji jsou ještě v normě, kdy bývá výrobcí motorů udávána právě hodnota 5 % jako maximální. Je ale patrné, že po druhém výměnném intervalu oleje dochází k velmi překvapivému a celkem strmému nárůstu paliva ve zkoumaném oleji. Hodnoty se pohybovaly okolo 7 %, což jsou hodnoty, které by už mohly napovídat nějakému konstrukčnímu problému v motoru. Lze to například přisuzovat zvětšené vůli na pístních kroužkách a nedostatečnému těsnění spalovací komory válce od olejové náplně. Je také možné, že letadlo bylo využíváno jen na kratší náročnější lety, nebo bylo před jednotlivými lety nedostatečně ohřáto na provozní teplotu oleje, která se dodržuje na min. 50 °C před nastavením max. vzletového výkonu.



**Obrázek 22 Obsah paliva v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]**

Vzorky oleje Aeroshell oil W 15W-50 z letounu Cessna 150 (OK-FOR) prošly také analýzou podílu paliva v motorovém oleji a průběh v závislosti na odlétaných hodinách je znázorněn na obrázku 23 níže. Tento motorový olej nevykazoval žádné zvýšené hodnoty, jako tomu bylo u předešlého motorového oleje Aeroshell OILSPORT PLUS 4 a hodnoty se pohybovaly po celou dobu v přijatelných mezích pod 4 %. Jen hodnota podílu těkavých látek při odběru vzorku po 5987 hodinách vykazovala nárůst na 4,4 %. Vzhledem k ostatním

hodnotám se ale jednalo o krátkodobý nárůst. Přesto lze z obrázku 23 odečíst zvyšující se podíl paliva v oleji během posledních 100 letových hodin. Tento motor měl těsně před generální opravou, a proto se dal mírný nárůst těkavých látek v oleji předpokládat. Hodnoty okolo 2-3 % během provozu jsou však plně dostačující a nepřekračují normy.



*Obrázek 23 Obsah paliva v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]*

#### 4.3 Výsledky analýzy částic pomocí LaserNet Fines®-C

Analýza částic pomocí laserového analyzátoru byla provedena u každého odebraného vzorku maziva. Vyneseny jsou tedy závislosti obou měřených olejů z letadel Atec 122 Zephyr a Cessna 150 (OK-HUG 09, OK-FOR).

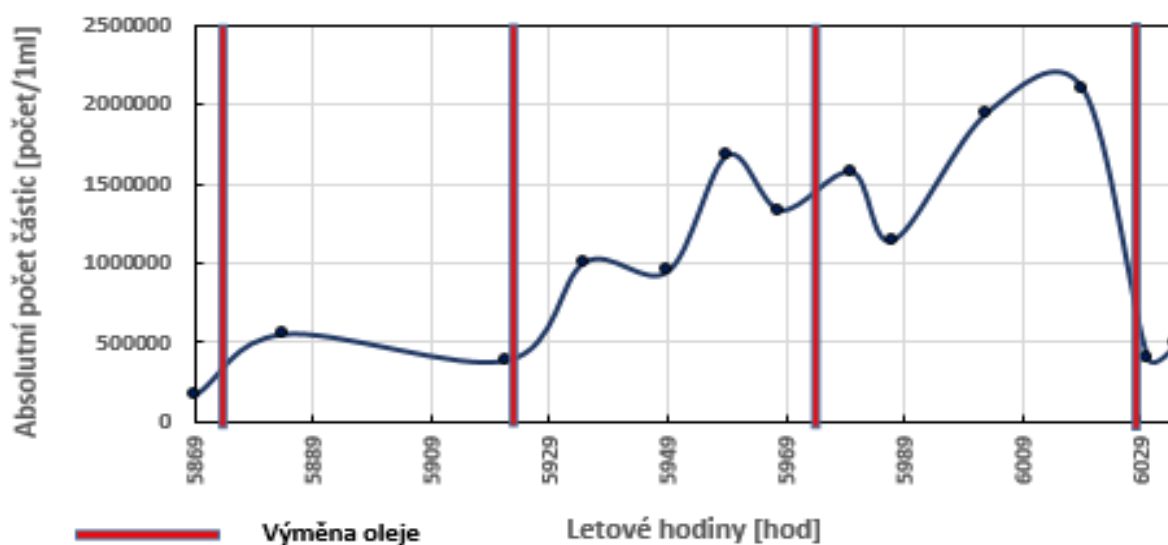
Všechny vzorky byly před měřením náležitě promíchány pro zvýšení jejich homogenity, a dále prošly přes ultrazvukový odlučovač bublin kvůli možnému zkreslení výsledků. Při každém měření si LaserNet Fines®-C nasál do měřicího systému potřebné množství vzorku a započal automaticky analýzu vzorku. Vše bylo ovládáno přes software dodávaný k tomuto přístroji. Zde byly reprodukovány naměřené výsledky, ze kterých byly zpracovány následující grafické závislosti.

V průběhu měření byly zaznamenány občasné anomálie v naměřených hodnotách, a to buď obrovský nárůst, či pokles naměřených hodnot od předešlého vzorku. Bylo tedy potřeba několik měření opakovat. Výsledky tak byly opraveny, nebo musel být vzorek vyloučen z hodnocení pro jeho zavádějící výsledky, které mohly být způsobeny možným nedodržením

metodiky odběru vzorku popsaných v kapitole 3.7 *Metodika odběru vzorků oleje*, nebo nesprávnou přípravou vzorku.

#### 4.3.1 Částicová analýza motoru Continental O-200-A

Podle obrázku 24 je patrné, jak během provozu docházelo k nárůstu počtu částic detekovaných při analýze. Do druhé výměny olejové náplně nedocházelo ještě k žádným změnám a zkoumaný olej si držel celkové množství částic stále okolo hodnoty 500000 částic. Po výměně olejové náplně po 5923 letové hodině ale dochází k velkému nárůstu počtu částic, a to až o celý 1 milion částic na 1ml vzorku, až do letové hodiny 5974, ve které dochází k další výměně olejové náplně. Po výměně oleje ale opět dochází k nárůstu k hodnotě až 2 mil. částic. Po 6028 let. hodině se počet částic vrátil k původním hodnotám okolo 500000 částic/1 ml. Lze tak usuzovat, že během dvou servisních intervalů od 5923 do 6028 odlétané hodiny docházelo k nedokonalé filtraci oleje, nebo možným problémům se správnou prací motoru Continental O- 200-A. Pro důkladnější analýzu bude přínosnější analýza počtu částic nad 20  $\mu\text{m}$  a jejich kvalifikace do jednotlivých druhů opotřebení viz obrázek 24.

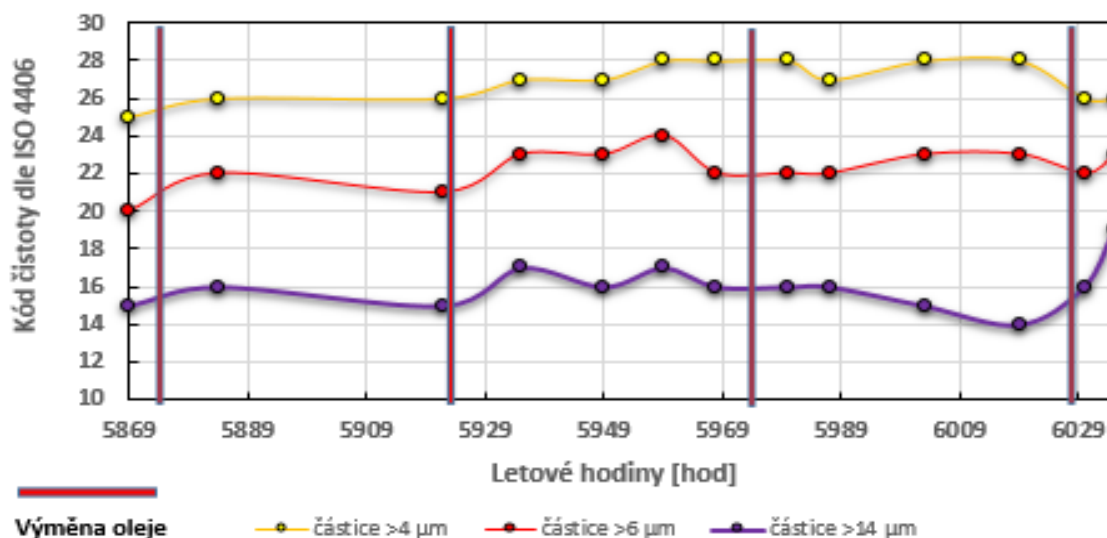


**Obrázek 24 Absolutní počet částic v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]**

Dalším znázorněním konkrétně na obrázku 25 je závislost kódu čistoty podle normy ISO 4406 na letových hodinách stroje. Tato norma rozlišuje tři kategorie částic podle jejich velikosti na  $> 4\mu\text{m}$ ,  $> 6\mu\text{m}$  a  $> 14\mu\text{m}$ . Podle grafického znázornění je sledován po celou dobu provozu mírný, ale stálý nárůst hodnoty kódu čistoty. Až při výměně olejové náplně po 5974 letové hodině dochází ke snížení počtu částic  $> 14\mu\text{m}$  a poklesu kódu čistoty až o tři celé



jednotky oproti nejvyšší hodnotě, která byla dosažena mezi druhou a třetí výměnou olejové náplně. Naopak menší částice  $> 4\mu\text{m}$ ,  $> 6\mu\text{m}$  si udržují nárůst a vysoké hodnoty po celou zkoumanou dobu provozu.

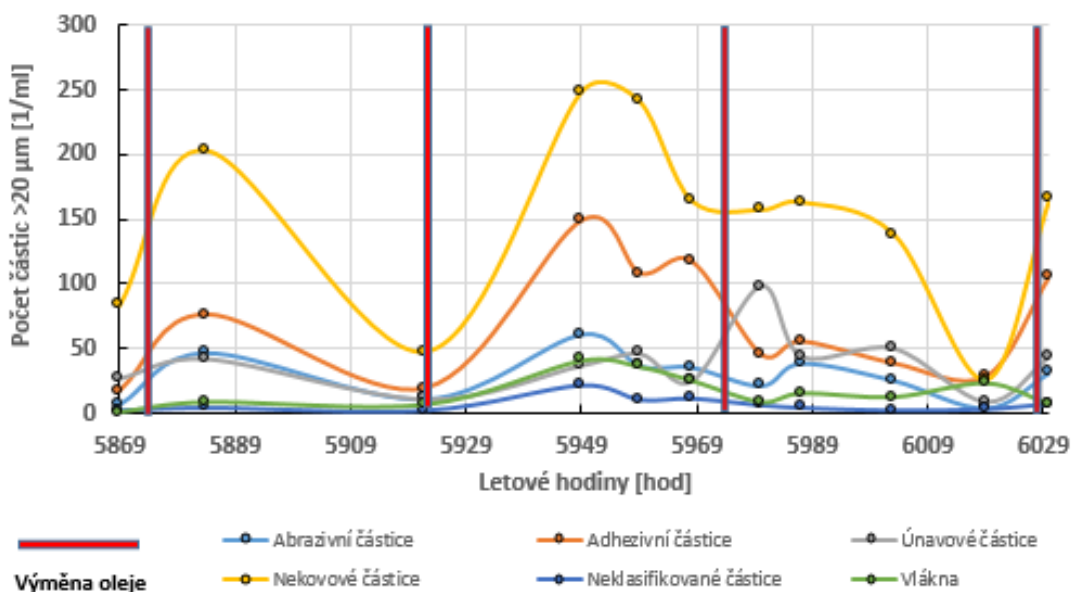


**Obrázek 25 Kód čistoty v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]**

Mezi konkrétnější analýzu počtu částic na 1 ml vzorku je považována analýza počtu částic s velikostí nad  $20\mu\text{m}$ . Od této hodnoty dokáže právě laserový analyzátor LaserNet Fines®-C rozeznávat velikost včetně tvaru jednotlivých částic, a rozřazovat je do příslušných skupin opotřebení podle vložené knihovny viz obrázek 14.

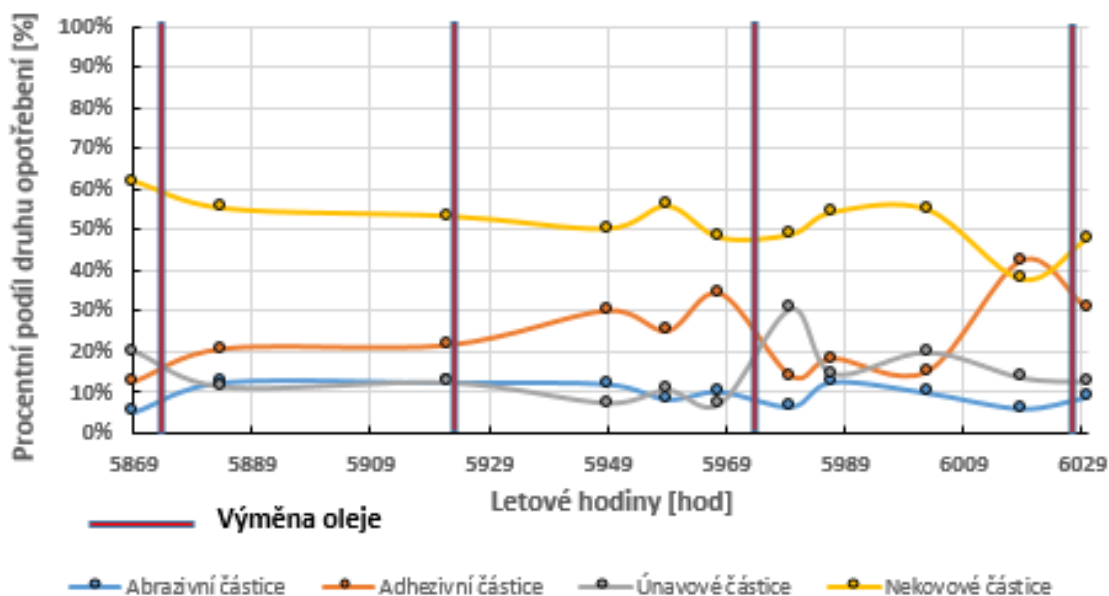
Obrázek 26 znázorňuje počet částic  $> 20\mu\text{m}$  a charakterizuje jejich opotřebení v závislosti na letových hodinách daného letadla. V největším počtu jsou ve vzorku oleje obsaženy nekovové částice, což je obecným trendem. Jejich grafická křivka je velmi zvlhňená a hodnoty kolísají během čtyř výměnných intervalů mezi 40 až 250 částicemi/1 ml vzorku. Téměř shodný průběh mají adhezivní částice, které jsou zde zastoupeny kvantitativně v daleko menší míře. Ve výsledných hodnotách ale opět figuruje velmi nepravidelný průběh, a to konkrétněji nekovových a adhezivních částic mezi druhým a čtvrtým výměnným intervalem. Podle certifikátu o provedené údržbě při těchto výměnných intervalech, ale nedošlo kromě výměny olejové náplně a olejového filtru k žádným jiným servisním zásahům. Podle zvýšeného výskytu vláken z olejového čističe mezi těmito výměnnými intervaly by mohlo být jednou z příčin zvýšených hodnot nekovových a adhezivních částic ve vzorku nesprávná funkce olejového filtru z nějaké provozní příčiny. Nelze ale jinak plně klasifikovat příčinu výkyvu hodnot částic mezi těmito intervaly. Ostatní druhy částic jako únavové, abrazivní

a neklasifikované během zkoumané doby nevykazují žádný výraznější výkyv a udržují si stále téměř shodnou charakteristiku křivky.



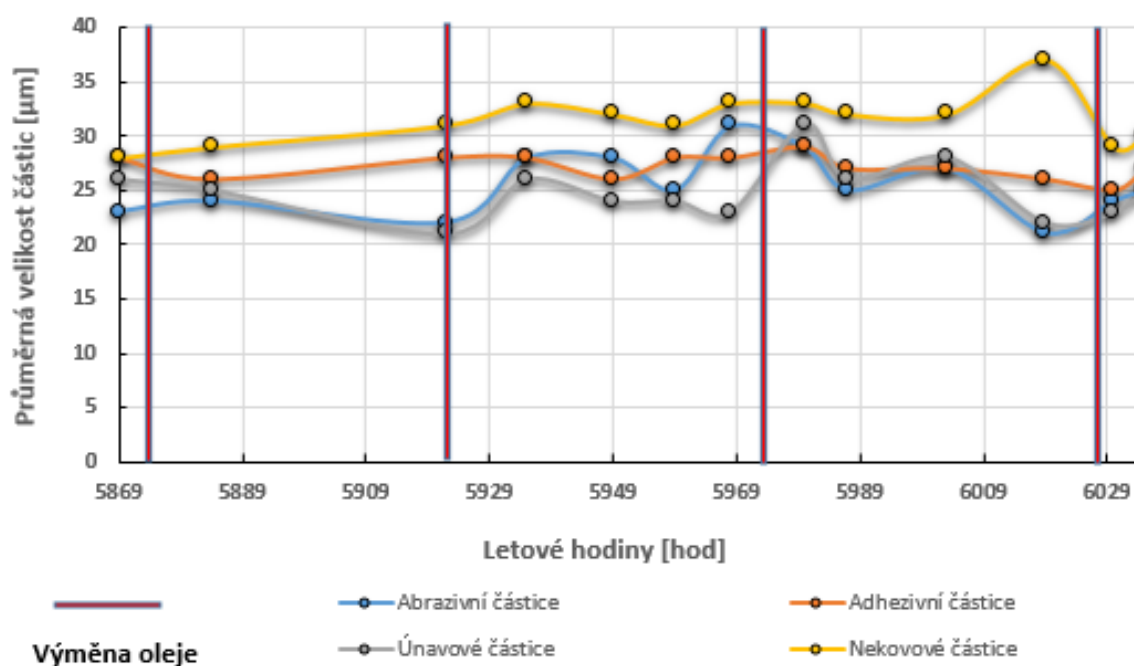
**Obrázek 26 Počet částic > 20 µm v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]**

Procentní podíl částic jednotlivých klasifikovaných opotřebení v závislosti na době provozu je graficky znázorněna níže na obrázku 27. Nekovové částice zaujímají 50 až 60 % počtu částic ve vzorku oleje. Obsah adhezivních částic po dobu provozu mírně stoupá společně s únavovými částicemi, a ke konci dosahují průměrných hodnot okolo 20-25 % ve vzorku oleje. Nejméně jsou obsaženy částice abrazivního charakteru.



**Obrázek 27 Procentní podíl druhu opotřebení v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]**

Průměrná velikost částic  $> 20 \mu\text{m}$ , tedy i s možností indikace druhu opotřebení je uvedena v závislosti na letových hodinách na obrázku 28. Nejvíce vypovídající je zde trend nekovových částic. Mezi jednotlivými výměnnými intervaly vždy mírně stoupá a částice se tak zvětšují s dobou provozu. Potvrzuje tak okysličování oleje a jeho postupnou degradaci s dobou provozu, kdy vznikají v olejové náplni usazeniny a tyto karbonové úsady se zde usazují. LNF je pak vyhodnocuje právě jako nekovové částice, které se s dobou provozu stále zvětšují. Únavové a abrazivní částice vykazují zvýšené hodnoty v oblasti mezi druhou a třetí výměnou oleje a poté klesají na původní hodnotu okolo  $25 \mu\text{m}$ . Adhezivní částice si po celou dobu provozu zachovávají velmi klidný průběh z hlediska velikosti jejich částic.

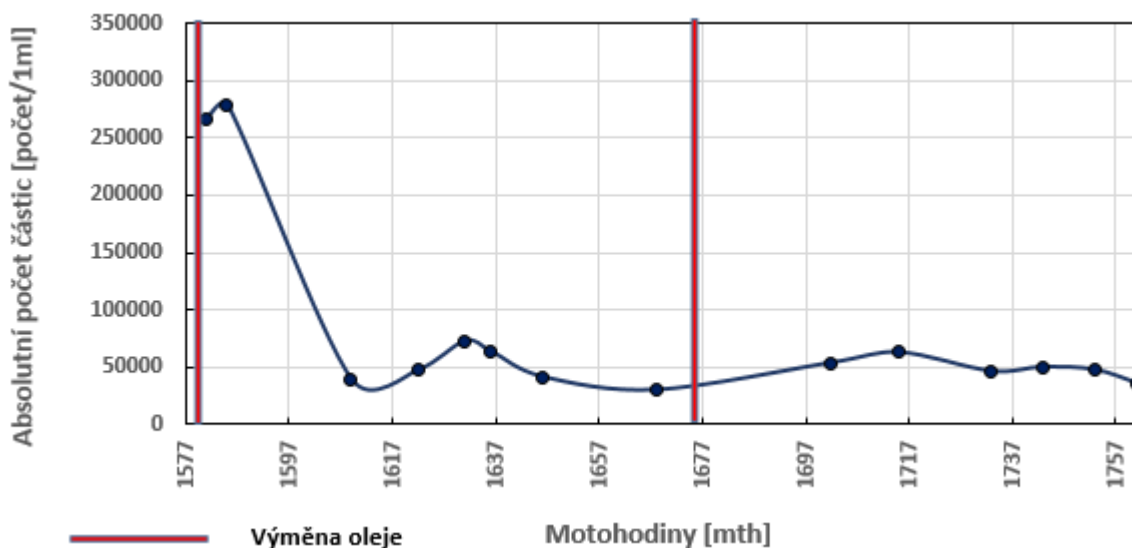


**Obrázek 28 Průměrná velikost částic v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]**

### 4.3.2 Částicová analýza motoru Rotax 912 UL

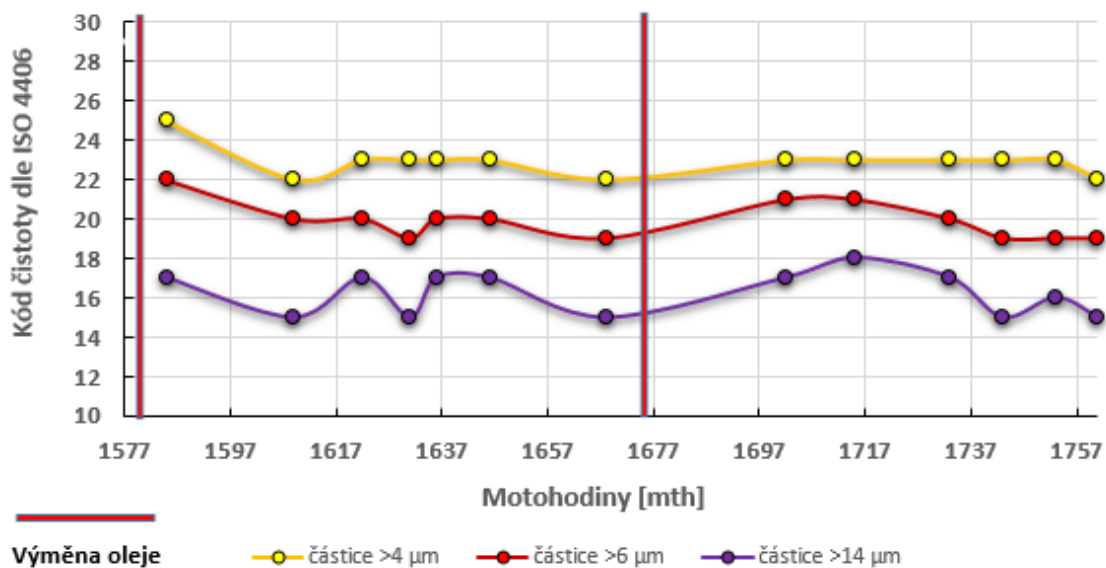
První zkoumanou hodnotou je absolutní počet částic v 1 ml vzorku oleje Aeroshell OILSPORT PLUS 4 v závislosti na počtu motohodin daného motoru. Grafické vyhodnocení výsledků je na obrázku 29. První hodnota počtu částic pocházející ze vzorku odebraném při 1577 mth musela být vyloučena z analýzy kvůli velmi vysoké hodnotě, která nenaznačovala závislost na ostatních naměřených hodnotách, které byly posazeny řádově o statisíce níže. Z obrázku 29 je ale patrný strmý pokles počtu částic během prvních 30 mth. Poté se trend počtu částic ustálil, a až na menší výkyvy se držel okolo stejných hodnot během monitorování celé

doby provozu stroje. Je tak možno předpokládat, že při první výměně oleje mohlo dojít neodbornou manipulací nebo jinou chybou k nárazovému zvýšení počtu pevných částic v olejové náplni motoru. Poté docházelo k filtraci tohoto kontaminovaného oleje, která trvala celých 30 mth až do dosažení ustálených hodnot. Po další výměně už ale nedochází k žádnému výkyvu hodnot a je tak velmi zajímavé, proč právě ihned po první výměně oleje při 1580 mth došlo k takovému nárůstu hodnot. Je možné, že zde už nedošlo k chybě při výměně motorového oleje.



**Obrázek 29 Absolutní počet částic v Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]**

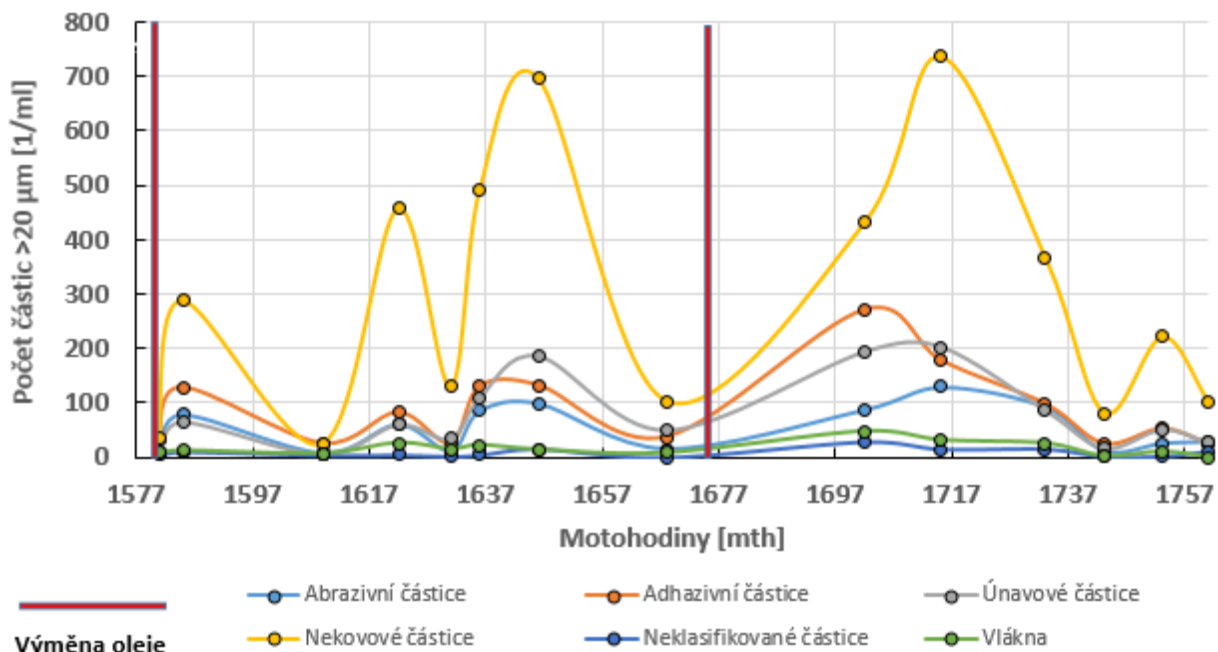
Obrázek 30 mapuje závislost kódu čistoty podle normy ISO 4406 na motohodinách motoru. Podle předešlého obrázku 29 se pokles částic objevuje na obrázku 30 v podobě klesajícího kódu čistoty a to u všech tří velikostních kategorií. Poté už se kód čistoty odebraných vzorků oleje výrazně neliší a drží se lineárního trendu až do další výměny oleje při 1681 mth, kde dochází k nárůstu a následnému poklesu částic  $> 4\mu\text{m}$  a  $> 6\mu\text{m}$ . Částice  $> 14\mu\text{m}$  si udržují konstantní hodnotu kódu čistoty a tedy velmi stabilní průběh.



**Obrázek 30 Kód čistoty v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]**

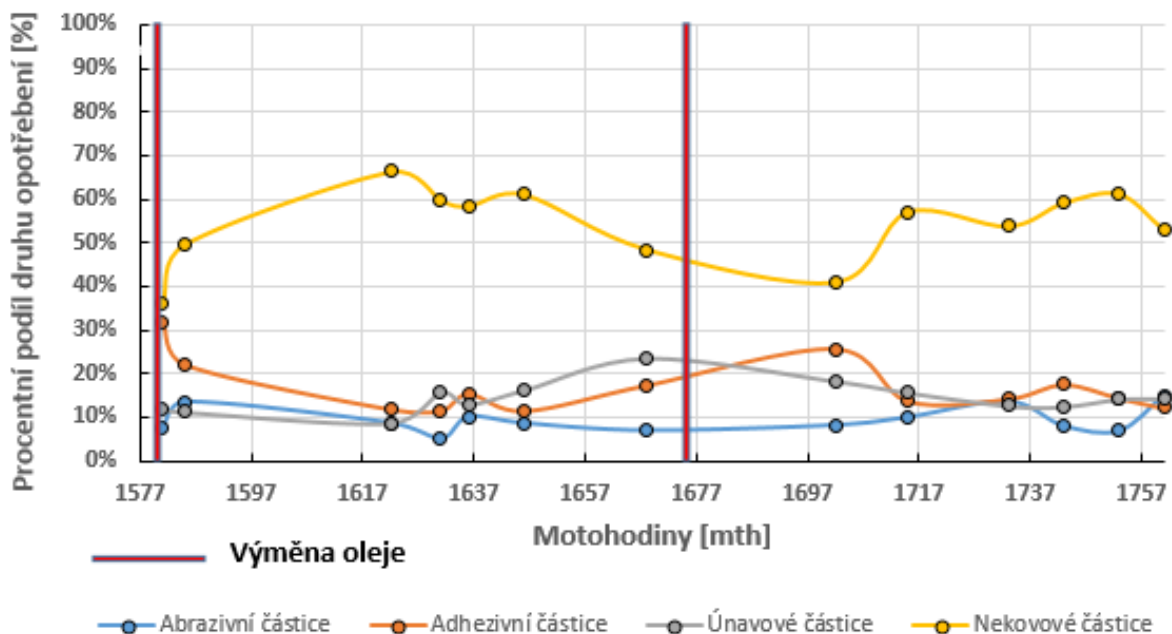
Grafická analýza počtu částic nad 20 µm s ohledem na odpracované motohodiny motoru viz obrázek 31 je velmi zavádějící. Konkrétně počet nekovových částic obsažených ve vzorcích je velmi kolísavého charakteru. U stejné analýzy motoru Continental O-200-A se počty nekovových částic pohybovaly v rozmezí ± 200 částic/1 ml vzorku po celou dobu provozu. U tohoto motoru Rotax 912 UL se pohybují počty nekovových částic v rozmezí ± 650 částic/1 ml vzorku. Možnost může být i v mírném porušení metodiky odběru, kdy bylo provozně nemožné dodržet odběr vzorků při pracovní teplotě motoru ihned po příletu z důvodu vytíženosti stroje a jeho nepravidelnému provozu, a v neposlední řadě i autora diplomové práce.

V prvním 100 hodinovém servisním intervalu se počty adhezivních, abrazivních, únavových, neklasifikovaných, ale i vláken filtru drží celkem stabilního trendu a nevykazují žádné hrozící nebezpečí pro motor. Po výměně olejové náplně po 1681 mth dochází k nárůstu všech druhů částic. Po 40 mth ale dochází ke strmějšímu poklesu a stabilizaci počtu částic na velmi přijatelné a nízké hodnoty. Lze tak proto předpokládat, že filtrační systém olejové náplně potřebuje ke stabilizaci ve filtraci cca 30 až 40 mth. Tato hodnota byla vysledována už při hodnocení celkového počtu částic viz obrázek 29.



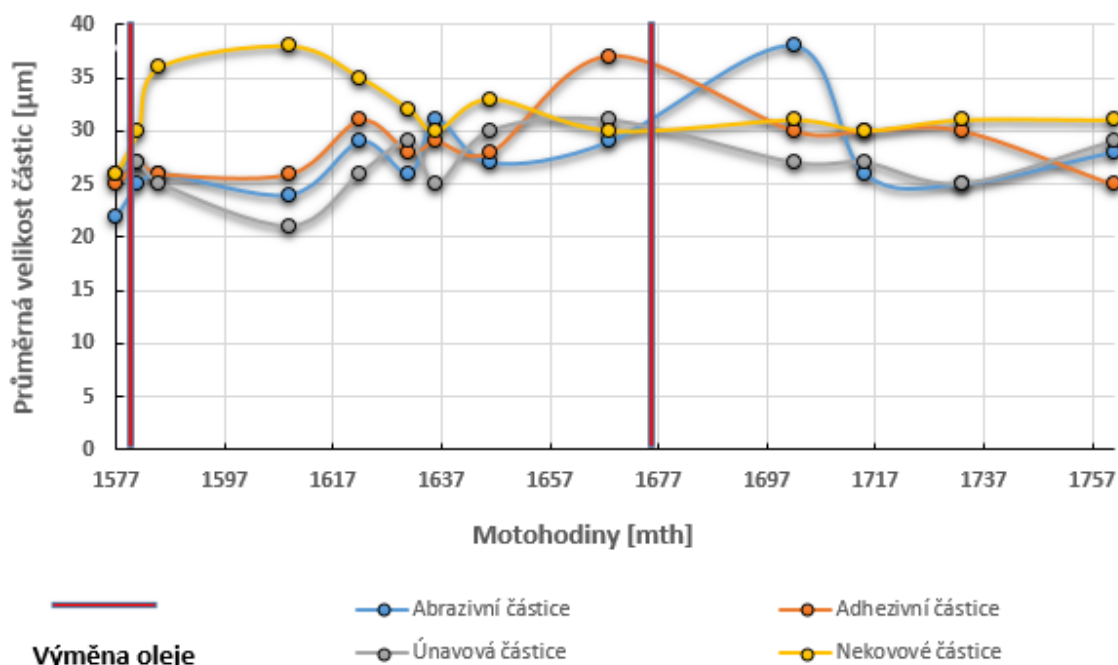
Obrázek 31 Počet částic > 20 µm v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]

Procentní podíl částic jednotlivých opotřebení viz obrázek 32 znázorňuje, jako u předešlého motoru největší podíl nekovových částic ve zkoumaném oleji. Pohybují se okolo 60 % a mírného poklesu dosahují jen ihned po výměně olejové náplně a poté se vracejí na původní hodnoty. Občasného výkyvu dosahují částice adhezivního a únavového charakteru. Abrazivní částice si drží po celou dobu provozu téměř lineární charakteristiku.



Obrázek 32 Procentní podíl druhu opotřebení v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]

Při podrobnějším zkoumání průměrné velikosti částic s ohledem na jejich druh opotřebení podle obrázku 33 je sledován ihned po první výměně olejové náplně po 1580 mth znepokojující nárůst velikosti nekovových částic přes 35  $\mu\text{m}$ , který vydržel téměř 40 mth, než klesl k 30  $\mu\text{m}$ . K dalšímu nárůstu nedošlo, a tuto velikost částic si udržel olej až do konce monitorovaného období. Velikost adhezivních částic se během prvního výměnného intervalu zvyšovala ještě daleko více, a to od 25  $\mu\text{m}$  až k hodnotě 37  $\mu\text{m}$  před výměnou olejové náplně. Po výměně se postupně velikost snižovala až k původní hodnotě. Únavové i abrazivní částice si udržely podobnou velikost jejich částic po celou dobu provozu, jen abrazivní částice dosáhly výkyvu až téměř k 40  $\mu\text{m}$  po druhé výměně oleje. Poté se ustálily na původních hodnotách okolo 25  $\mu\text{m}$ .



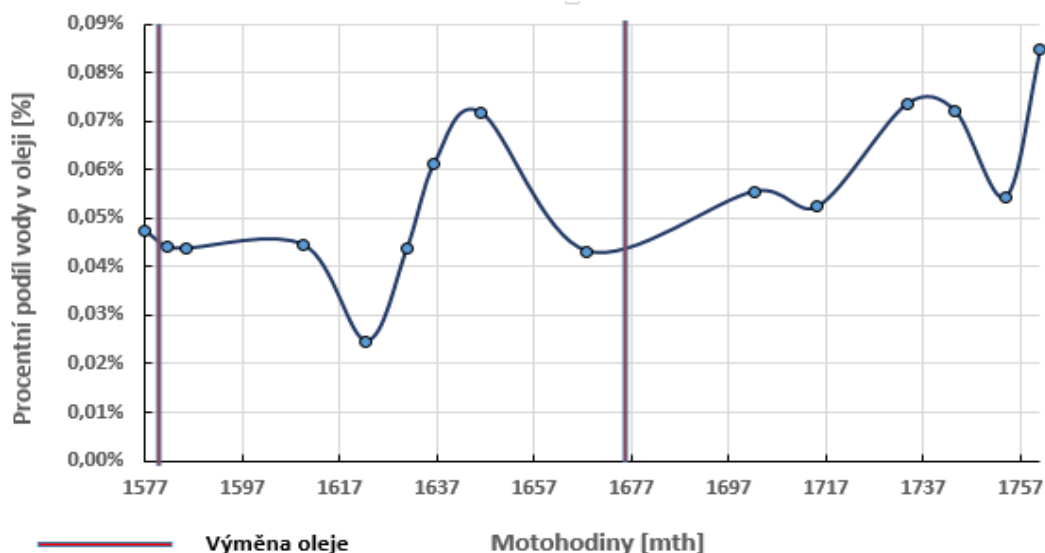
**Obrázek 33 Průměrná velikost částic v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]**

#### 4.4 Výsledky stanovení obsahu vody přístrojem Coulometer WTD

Voda v palivu je zcela běžný jev a nelze mu zcela zabránit. Voda v oleji je rozpustitelná jen v zanedbatelném množství a zbytek se usazuje na dně olejové náplně. Je důležité sledovat množství vody v oleji a udržovat jej v doporučených mezích. U zážehových motorů by obsah vody v oleji neměl přesahovat 0,2 %.

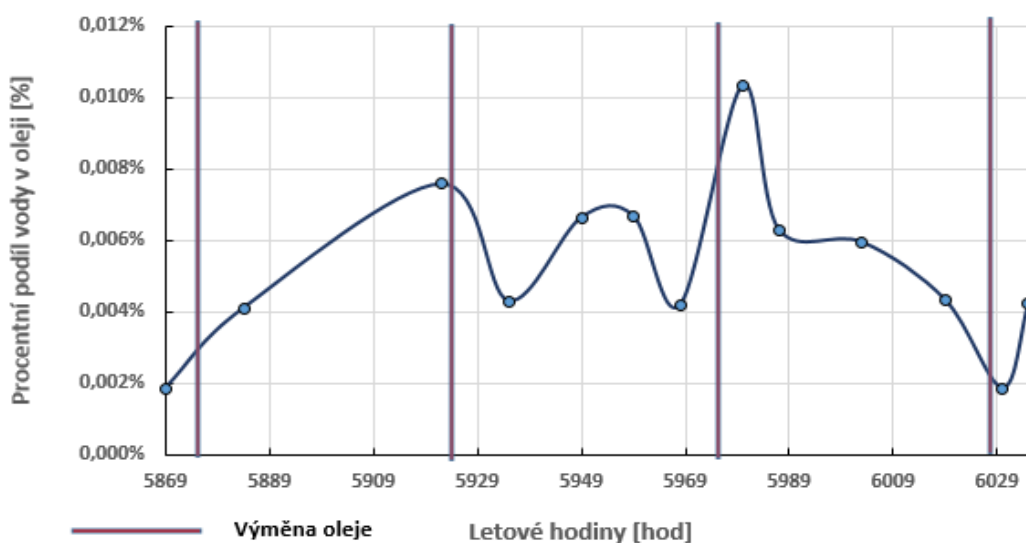
Při vyhodnocování obrázku 34 je možno zpozorovat skokové změny v množství vody v oleji v závislosti na motohodinách motoru Rotax 912 UL. K těmto skokovým změnám v procentuálním podílu dochází nejspíše v důsledku odběru vzorku po kratších letech,

kdy se zkondenzovaná voda z paliva nestačila řádně vyloučit vypařováním. Právě krátké lety způsobují nárůst vody v palivu, stejně jako u krátkých několikakilometrových jízd automobilem. Voda se nestačí přirozeně vyloučit a v podobě kapek se usazuje v olejové nádrži. Při intenzivním promíchávání vzniká hnědá emulze, která ale nebyla u zkoumaného oleje spatřena, a to hlavně z důvodu velmi malého procentního podílu obsahu vody, který se pohyboval v průměru okolo 0,06 %.



**Obrázek 34 Procentní podíl vody v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]**

Vyhodnocení procentního podílu vody v motorovém oleji motoru Continental O-200-A na obrázku 35 je v celku zbytečné. Průběh je sice velmi neklidný, pohybuje se však v hodnotách několika tisícín procent podílu vody v oleji. Naprosto tak splňuje podmínku obsahu vody max. 0,2 % a vzorky jsou zcela uspokojivé.



**Obrázek 35 Procentní podíl vody v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]**



## 4.5 Vyhodnocení měření a diskuze

Tribodiagnostická analýza motorových olejů odebíraných během provozu letadlové techniky by měla určitým způsobem vypovídat o technickém stavu motoru. Za tímto účelem, i za účelem doporučení z hlediska údržby motoru a monitorování potřeby výměn jejich olejových náplní po výrobcem, či předpisem stanovených hodinách motoru (letových hodin nebo motohodin) byla tato analýza prováděna.

Už při samotném měření v laboratoři tribodiagnostiky na ČZU se autor práce shledával s výsledky jednotlivých testů, které byly někdy opravdu zavádějící a vypovídaly spíše o porušení metodiky odběru, která byla v praxi velmi obtížně dosažitelná. Několik vzorků tak muselo být při vyhodnocování vyřazeno pro jejich zavádějící hodnoty. Samotné měření na jednotlivých přístrojích jako byly Stabingerův viskozimetr, ferograf, analyzátor částic LNF či Coulometer WTD bylo náročné na správnou přípravu vzorku, a další k tomu přídatné operace. Autor práce se po dobu měření a vyhodnocování neustále více přesvědčoval o tom, jak důležité je dodržet pro získání správných výsledků kompletně celý řetězec činností určených k provedení tribodiagnostické analýzy oleje. Počínaje od přípravy vhodné odměrné nádoby, nastaveného odebíracího systému a potřebných dalších nástrojů, označení vzorku, jeho skladování, přípravu vzorku k měření a dodržení postupu při měření a čistotu měřících systémů atd.. Porušení jen jednoho z těchto prvků řetězce bylo při měření ihned zaznamenáno v podobě naměřených hodnot, nebo jen v obtížnější identifikaci vzorku. Podařilo se i tak získat mnoho velmi zajímavých výsledků, které byly graficky zpracovány a detailně popsány v předešlých kapitolách 4.1 až 4.4.

Z jednotlivých grafických zobrazení bylo patrné určité zkreslení výsledků v podobě výkyvů hodnot někdy menšího či většího charakteru, které byly zapříčiněny hlavně provozem leteckého motoru. Právě díky prostředí, ve kterém pracuje motor, tj. v letadle, znamená podle autora naprosto rozdílné trendy křivek oproti automobilovému prostředí. Letadlo se po dobu svého provozu neustále pohybuje ve všech třech možných osách manévrování v hodnotách náklonů, ve kterých by automobilové motory nedokázaly až na výjimky nejspíše vůbec plnit schopnost mazání pohyblivých skupin. Přesto, že je letecký motor konstruován a připraven na takovýto náročný provoz, tak dochází během provozu k daleko větším olejovým ztrátám, než je tomu u běžných automobilových motorů. Z tohoto důvodu je hladina oleje kontrolována téměř před každým letem a je neustále doplňován, a to v krátkých intervalech. Takto doplněný olej do mazacího systému pak neustále ztěžuje možnost správného vyhodnocení technického stavu a znemožňuje možnost lineárnějšího trendu naměřených hodnot nejenom u částicové, ale

i u většiny dalších tribodiagnostických analýz. Z hlediska tribodiagnostiky je tak vyslovení závěrů o technickém stavu obou leteckých motorů a doporučení vhodné korekce v jejich údržbě, které bylo předmětem této diplomové práce, velmi obtížné.

Při první analýze, kterou bylo měření viskozity při 40°C a 100°C a jeho doprovodného výsledku v podobě naměřené hustoty, se neprojevil žádný ukazatel v limitních hodnotách, a právě nejspíše dolévání olejové náplně zapříčinilo v tomto případě velmi přívětivých hodnot, kde si oba zkoumané oleje Aeroshell W 15W-50 i Aeroshell OILSPORT PLUS 4 udržely stejné hodnoty viskozity a hustoty po celou dobu provozu. Právě v případě viskozitní charakteristiky bylo očekáváno poklesu viskozity s dobou provozu, a to u motoru Rotax 912 UL, který vykazoval při analýze množství paliva po druhé výměně olejové náplně velmi vysokých hodnot. Tyto vysoké hodnoty paliva by měly snižovat viskozitu oleje. Zde se tak stalo, a právě po druhé výměně oleje po 1681 mth začala viskozita oleje lineárně klesat a potvrzovala zvýšené hodnoty paliva v oleji.

Vysoké hodnoty podílu paliva v oleji byly následně potvrzeny doplňkovým měřením bodu vzplanutí. Měření bylo provedeno u dvou vzorků, které vykazovaly nejvyšší hodnoty podílu paliva. Byly to odebrané vzorky oleje při 1743 mth a 1760 mth. Pro nedostatečný objem obou vzorků byly společně smíchány a měřeny jako jeden vzorek. Oba vzorky ale vykazovaly téměř stejné hodnoty podílu paliva, a to 7,6 a 7,5 %, proto by tak nemělo dojít k žádnému zkreslení výsledků. U tohoto vzorku oleje byl naměřen bod vzplanutí při 97 °C. Následně byla provedena korekce výsledku podle aktuálních podmínek měření podle vztahu (3) a následujícím dosazením. Atmosférický tlak okolí v době měření byl naměřen na hodnotu 100,9 kPa.

$$T_c = 97 \text{ °C} + 0,25 \cdot (101,3 - 100,9) \quad (8)$$

$$T_c = 97,1 \text{ °C}$$

Výrobce oleje je uvedená hodnota bodu vzplanutí pro nový olej 228°C. Měřením bodu vzplanutí byl potvrzen vysoký výsledek podílu paliva v oleji, kde byla hodnota bodu vzplanutí 228°C během provozu snížena až na 97 °C.

Motor Continental O-200-A a jeho sledovaný olej Aeroshell W 15W-50 vykazoval mnohem příznivější výsledky ohledně množství paliva v něm obsaženého. Nebyl tak ani očekáván rozptyl hodnot ve viskozitě oleje. Při bližším zkoumání se ale i u tohoto vzorku velmi pěkně odráží trend množství paliva v oleji na jeho viskozitě, která byla v místech se zvýšeným množstvím paliva v poklesu a naopak. Po vyhodnocení této vzájemné korelace je znatelnější závislost množství paliva ve vzorku u oleje Aeroshell W 15W-50, než u Aeroshell OILSPORT

PLUS 4. U Aeroshell W 15W-50 se kinematická viskozita snížila při změně jen 1 % bodu v podobě množství paliva až o 20 mm<sup>2</sup>/s, oproti oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4, kde cca. 3% nárůst paliva znamenal snížení viskozity jen o 10 mm<sup>2</sup>/s. Tato skutečnost by mohla být zapříčiněna používáním rozdílného paliva v obou motorech. Motor Rotax 912 UL v ultralehkém letadle Atec 122 Zephyr spaluje Natural 95, oproti motoru Continental O-200-A, který je poháněn leteckým benzínem AVGAS 100. Rozdílnost v druhu paliva by tak mohla být příčinou rozdílného ovlivňování viskozity oleje.

Další dílčí vyhodnocení patří analýze částic pomocí laserového analyzátoru LaserNet Fines®-C. Už během měření bylo patrné, že vzorky oleje Aeroshell W 15W-50 letadla Cessna 150 vykazují abnormálně vysoký počet částic. Bylo tak provedeno více měření pro kontrolu i důkladnější příprava vzorku, která ale prokázala správnost těchto výsledků. Běžnými hodnotami celkového počtu částic v oleji jsou desítky tisíc. Vzorky oleje z motoru Continental O-200-A dosahovaly hodnot až okolo dvou miliónů. Rozdíl oproti oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 z motoru Rotax 912 UL byl markantní. Zde vzorky dosahovaly dlouhodobě hodnot okolo 50 tisíc.

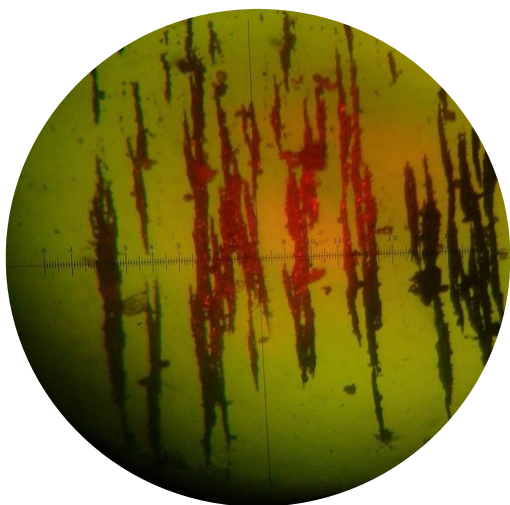
Po důkladnější analýze, která obsahovala rozbor částic nad 20 µm je rozpoznán druh jednotlivých částic. U obou motorů zaujímají největší podíl částice nekovového charakteru a po detailnějším porovnání je zjištěn větší počet nekovových částic u motoru Rotax. Je tak zřejmé, že v motoru Continental je výhradní podíl částic menších než 20 µm, které nedokázal analyzátor identifikovat a neobjevily se tak ani v rozboru jednotlivých částic. Je tak možno se domnívat, že v tomto motoru dochází k určitému technickému problému jako např. zvětšený počet otěrových částic na stěnách válce, nekvalitní spalování paliva atd.. Při kontrole množství sazí byly ale hodnoty nulové, a nelze tak zjistit příčinu takového vysokého počtu částic. Při náhledu na hodnocení čistoty oleje podle normy ISO 4406, která se řídí počtem částic ve vzorku ve velikostech >4 µm >6 µm a >14 µm byla ohodnocena čistota oleje Aeroshell W 15W-50 vysokými hodnotami téměř až k maximální hodnotě kategorie pro nejmenší částice >4 µm. Kód čistoty u oleje pro motor Rotax 912 UL dosahoval velmi příznivých hodnot.

Další možnost hodnocení, kterou LNF umožňuje, je vyhodnocení průměrných velikostí částic včetně rozřazení podle jednotlivých druhů opotřebení. U obou motorů byly velikosti nekovových částic v rozmezí okolo 30 µm a s dobou provozu mírně stoupá v důsledku degradace oleje a vytváření stále větších částic. U ostatních druhů opotřebení a jejich průměrných velikostí si oba motory též zachovaly velmi podobné hodnoty.

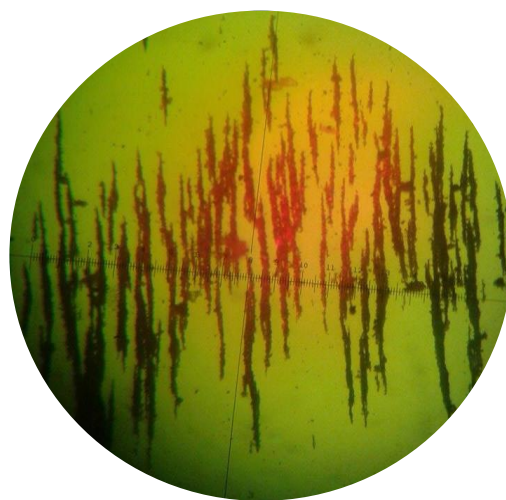
Zvýšené počty částic v oleji u motoru Continental byly podnětem pro provedení detailnější analýzy částic a to pomocí ferografu. Pro analýzu byl vybrán jeden vzorek oleje.

Konkrétně se jednalo o vzorek maziva odebraném při 5949 letových hodinách. Vzorek při částicové analýze pomocí LNF vykazoval oproti ostatním vzorkům zvýšený počet částic  $>20 \mu\text{m}$ , jednalo se zde hlavně o nekovové částice, adhezivní částice a částice abrazivního charakteru. Podle metodiky bylo provedeno toto ferografické měření a následné vyhodnocení pomocí mikroskopu.

Následující obrázky zachycují vybrané úseky ferogramu nebo přímo analyzovanou částici.



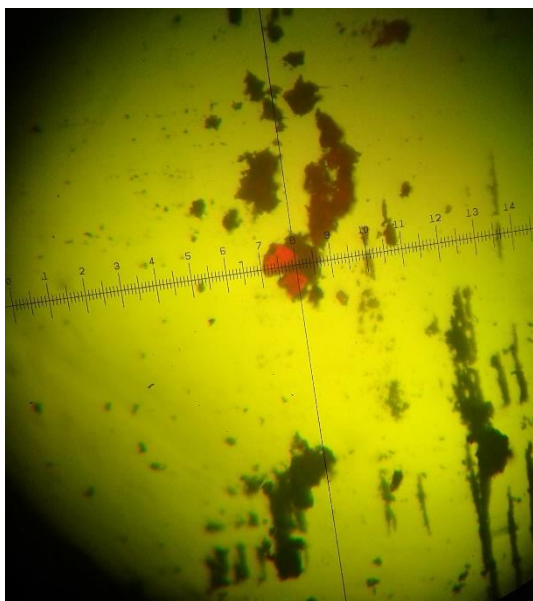
**Obrázek 37** *Vstupní část ferogramu [vlastní]*



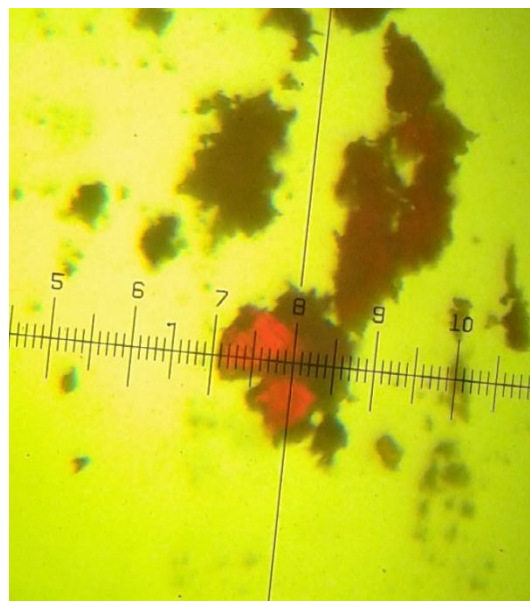
**Obrázek 36** *Snímek adhezivních částic ferografické stopy [vlastní]*

Na obrázku 37 je zachycena první část získaného ferogramu. Je zde patrný větší rozměr částic, který je na začátku stopy největší a se vzdáleností odečtu se částice zmenšují. Na snímku z mikroskopu je tak možno vidět největší zachycené částice adhezivního i abrazivního charakteru pospolu. Obrázek 36 je představitelem klasických adhezivních částic. Tento snímek byl pořízen v druhé části ferogramu. Tyto částice pokrývají největší část ferografické stopy, mají malou šířku a se vzdáleností odečtu od vstupní části ferogramu se k sobě více shlukují.

Obrázek 38 a 39 byl pořízen po nalezení typické únavové částice obsažené ve zkoumaném vzorku oleje. Tyto částice jsou trojrozměrné, což znamená, že délka, šířka a hloubka mají nepříliš rozdílné rozměry. Částice po přeměření v softwaru Lambdasoft 2007 dosahovala délky  $45 \mu\text{m}$  a šířky  $38 \mu\text{m}$ .



***Obrázek 38 Snímek únavové částice [vlastní]***



***Obrázek 39 Snímek únavové částice po přiblížení [vlastní]***

Při porovnání těchto výsledků s výsledky částicové analýzy LNF bylo potvrzeno, že největší část ferografické stopy měla být, a také byla pokryta rozměrnějšími adhezivními částicemi. Ve zkoumaném vzorku bylo vykazováno zvýšené množství adhezivních částic  $>20 \mu\text{m}$  viz obrázek 26 a ferogramem byl tento trend potvrzen.

Velmi malých hodnot dosahovalo měření množství vody obsaženém v oleji. Obecné doporučení udává max. podíl vody na 0,2 %. Hlavní příčinou malých hodnot obsahu vody v oleji je systém chlazení většiny leteckých pístových motorů. Tyto motory jsou totiž chlazeny náporově vzduchem. Jen motor Rotax 912 UL má kapalinou chlazené hlavy válců. Motor Continental O- 200-A je chlazen zcela jen náporovým vzduchem. Tato skutečnost v konstrukci chlazení je i přes velmi malé naměřené hodnoty znatelná, kdy Rotax vykazuje průměrné hodnoty procentuálního podílu vody v oleji 0,06 %. Motor Continental poté hodnoty okolo 0,006 %, což je desetkrát méně. Voda se tak v oleji vyskytuje jen výhradně ze vzdušné vlhkosti a vysrážené vodě na stěnách válců.

Pokud by byly tyto všechny naměřené hodnoty a dílčí závěry převedeny k doporučení ohledně plánované údržby těchto sledovaných motorů, tak z výše zmíněných důvodů, jako je zkreslení výsledků neustálým doléváním olejové náplně a nepravidelným letům velmi náročné. Avšak například množství paliva obsaženého ve vzorku oleje Aeroshell OILSPORT PLUS 4, které se pohybovalo až okolo 8 %, vypovídá o očividném problému s pronikáním paliva ze spalovacího prostoru do olejové náplně. Je zde tak patrné, že je tu problém s utěsněním

spalovacího prostoru. Doporučení z hlediska údržby by u tohoto motoru mohlo znamenat přeměření válců a možné výměně pístních kroužků. Další problém už nebyl u tohoto motoru vysledován, a po odstranění možné netěsnosti ve spalovacím prostoru tento motor vykazuje z hlediska částicové analýzy velmi příznivé výsledky. Zkrácení ani prodloužení intervalu olejové náplně by zde nebylo doporučeno a zdá se, že hodnota intervalu 100 mth je optimální.

Letecký motor Continental O-200-A vykazoval obrovské hodnoty množství částic obsažených v olejové náplni a doporučení z pohledu údržby by zde zahrnovalo vyčištění olejového systému motoru proplachovým olejem. Poté by musela opět následovat částicová analýza a monitoring několika letových hodin pro vyloučení závažnějšího problému se vznikem částic v motoru. Konkrétně u tohoto motoru by tak neměla být v žádném případě přesáhnuta hodnota padesáti letových hodin pro výměnu oleje. Tuto hodnotu ale stanovuje předpis, a proto ji ani nelze naštěstí překročit. Motor po autorově měření dosáhl hodinového fondu pro provedení generální opravy, která byla v tomto případě plně na místě. Měření po GO už nebylo provedeno.

## 5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provedení analýzy motorových olejů v letadlech a na základě těchto analýz navrhnout doporučení pro údržbu spalovacího motoru. Pro tento účel si autor práce vybral dvě letadla, a to ATEC 122 Zephyr a Cessna 150. V průběhu několika měsíců byly odebírány vzorky motorového oleje a sbírána tak data o průběžném technickém stavu obou motorů. Už v kapitole **4.5 Vyhodnocení měření a diskuze** je zmiňován problém s odebíráním jednotlivých vzorků z důvodu provozní vytíženosti letadel a nemožnosti dodržet správnou metodiku odběru. Dalším problémem je samotné vyhodnocení technického stavu motoru a doporučení z hlediska údržby či zhodnocení výměnných intervalů olejové náplně leteckého motoru.

Obě měřená letadla jsou určena pro výcviky pilotů nebo k pronájmu. Jejich vytíženost v letních měsících je vysoká a objevuje se zde i velká různorodost z hlediska druhu letu, který bude mít velký vliv právě na množství cizorodých částic v olejové náplni. Je několik možných druhů letů v provozu a každý z nich bude jinak ovlivňovat kvalitu mazacího oleje. Jsou lety navigační, kde je po delší dobu využit a nastaven stále stejný cestovní výkon motoru, jsou lety výcvikové, a to např. pro nácvik přistání, kde se režim motoru stále mění od maximálního vzletového až do volnoběžného režimu při přistání během pár minut. Dále lety pro nácvik nezvyklých poloh a vybírání pádů a pádů do vývrtek, či provádění ostrých zatáček. Zde se let odehrává ve větších výškách, která je ale velmi rychle proměnná a motor je dále ovlivňován kladným i negativním přetížením a zvýšeným náklonům.

Motory tak mají vyšší spotřebu oleje, který je neustále doléván. Množství dolévaného oleje a jednotlivé intervaly ale bohužel nebyly zaznamenávány. Získání výsledků, které by tak dokázaly objektivně znázornit trend opotřebení motoru a určitých změn, je téměř nemožné. Tento trend bylo možné zachytit jen u jediného měření a to u podílu těkavých látek v oleji, kde dolévání oleje nepůsobí až takové skokové změny.

Hlavním cílem autora se stalo hlavně zhodnocení výměnných intervalů olejové náplně, kde panovala myšlenka od většiny provozovatelů letadel, že je např. 50 hodinový interval výměny oleje u Cessny 150 přehnaný. Autor práce tuto pochybnost měl také, ale v průběhu měření dosahovaly některé výsledky takových hodnot, že pro konkrétní měřené letadlo byl tento výměnný interval ohodnocen jako dostačující a neměl by se prodlužovat. Samozřejmě je ale na zvážení, zda se nejednalo jen o výsledky tohoto konkrétního motoru, a u jiných letadel stejného typu by byly odečítány výsledky jiného charakteru.

Nebylo by zde tedy na místě hodnotit výměnné intervaly obou měřených motorů, ale mělo by zde spíše proběhnout zamyšlení se nad možností využití některých metod tribodiagnostické analýzy v provozu. Ta by dokázala právě poukázat na některé zvýšené hodnoty v průběhu provozu a predikovat možnou poruchu. Např. u motoru Rotax 912 UL by byl zachycen vysoký podíl paliva v oleji, který by mohl dosáhnout takových hodnot, že by mohlo v provozu dojít i k jeho poruše z důvodu nízké viskozity oleje a možné nouzové situaci během letu. Bohužel ani u jednoho z motorů není prováděna žádná analýza z hlediska kvality mazacího oleje. V „malém“ létání tak může docházet a dochází daleko častěji k problémům s pohonnými jednotkami, než je to v obchodní letecké přepravě, kde je tribodiagnostika používána, a to zejména u turbínových motorů.

Problémem tribodiagnostické analýzy je ale otázka financí. U letadel ultralehkých, která spadají pod leteckou amatérskou asociaci, což je případ měřeného letadla ATEC 122 Zephyr bude nemožné předepsat provozovatelům nutnost sledování stavu maziva přes nějakou tribodiagnostickou metodu. Tato letadla nemají ani povinnost používat certifikovaný letecký motor a není zde nutná ani důkladná dokumentace o provedené údržbě. Provozovatel letadla si za vše okolo údržby motoru zodpovídá sám (pokud nepoužívá certifikovaný motor pro letecký provoz).

Jinak je tomu ale u letadel nad 450 kg vzletové hmotnosti, která spadají pod Úřad pro civilní letectví. Zde už jsou používány certifikované motory pro letecký provoz a údržba je pevně stanovena. Údržba musí být prováděna v certifikovaném leteckém servisu a povoleném úřadem EASA (European Aviation Safety Agency). Zde by tak doporučení mohlo vypadat jako povinnost takového servisu provádět alespoň jednoduchou analýzu motorového oleje při jeho výměně. Za tímto účelem, a to jednoduchosti a rychlosti měření se jeví jako optimální Fuel Sniffer pro analýzu množství těkavých látek v oleji. Možnou alternativou by bylo i prozkoumání stavu filtru. Určitě by zde byla doporučena i částicová analýza, ta by ale narazila na cenu přístroje. Došlo by tak k dalšímu navýšení ceny údržby leteckých motorů, která není, a to zvláště pro malé provozovatele letecké techniky, příliš nízká.

Dokud tak nebude povinnost tribodiagnostické analýzy stanovena předpisem či výrobcem motoru, jako je to v obchodní letecké přepravě, bude bezpečnost tzv. „malého létání“ výhradně v rukou provozovatelů letadel.



## Seznam použité literatury

- [1] KELLER, Ladislav. *Učebnice pilota 2011: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. 1. vyd. Cheb: Svět křídel, 2011. ISBN 978-80-86808-90-1.
- [2] TŮMA, J. *Lietadlá pre 2. až 4. ročník študijných a učebných odborov SOU*. 2. vyd. ed. Bratislava: Alfa; 1985.
- [3] KOCÁB, Jindřich a Josef ADAMEC. *Letadlové motory*. Vyd. 1. Praha: KANT, 2000. ISBN 80-902914-0-6.
- [4] ADAMEC, Josef. *Pohonná jednotka (021 03): [učební texty dle předpisu JAR-FCL 1]*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-477
- [5] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-883-6.
- [6] CLARKE, Bill. *The Cessna 150 and 152*. 1st ed. Blue Ridge Summit, PA: Tab Books, 1987. ISBN 0830602224.
- [7] MASLENNIKOV, MM, RAPIPORT, MS. *Letadlové pístové motory*. 1. vyd. ed. Praha: Státní nakladatelství technické literatury; 1955.
- [8] KŘÍŽ, J. *Letecké motory*. 1. vyd. ed. Bratislava: Alfa; 1989.
- [9] SEJKOROVÁ, M. *Metody tribotechnické diagnostiky*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Univerzita Pardubice, 2013, ISBN 978-80-248-3280-7.
- [10] Aeroshell piston engine oils. [online]. Neuedeno. [cit. 2015-08-20]. *Typical temperature/viscosity curves of aeroshell W oils*. Dostupné z: <http://s07.static-shell.com/content/dam/shell/static/aviation/downloads/AeroShell-Book/aeroshell-book-3peo.pdf>
- [11] Oleje CZ Svět maziv [online]. Neuedeno. [cit. 2015-08-19]. *Viskozita automobilových motorových olejů*. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Viskozita-automobilovych-motorovych-oleju>

- [12] Masarykova univerzita. [online]. Neuveдено. [cit. 2015-08-20]. *Základní informace o jednotlivých skupinách nebezpečných látek a přípravků*. Dostupné z: [http://www.rect.muni.cz/nso/Chemicke\\_latky/soubory/obec\\_horlaviny.pdf](http://www.rect.muni.cz/nso/Chemicke_latky/soubory/obec_horlaviny.pdf)
- [13] Petroleum.cz [online]. Neuveдено. [cit. 2015-08-25]. *Výkladový slovník*. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/slovník.aspx?pid=60>
- [14] Oleje CZ Svět maziv [online]. Neuveдено. [cit. 2015-08-26]. *Vlastnosti motorových olejů- nečistoty a saze v motorovém oleji*. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Necistoty-a-saze-v-motorovem-oleji>
- [15] Oleje CZ Svět maziv [online]. Neuveдено. [cit. 2015-08-30]. *Vlastnosti motorových olejů- palivo v oleji*. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Palivo-v-oleji>
- [16] Oleje CZ Svět maziv [online]. Neuveдено. [cit. 2015-09-10]. *Vlastnosti motorových olejů- voda a glykol v oleji*. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Voda-a-glykol-v-oleji>
- [17] Oleje CZ Svět maziv [online]. Neuveдено. [cit. 2015-09-10]. *Vlastnosti motorových olejů- oxidační stabilita nitrace oleje*. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Oxidacni-stabilita--nitrace-oleje>
- [18] Přednášky z předmětu Technická diagnostika: Přednáška 9. [online]. [cit. 2015-12-18]. *Tribodiagnostika*. Dostupné z: <https://moodle.czu.cz/>
- [19] Přednášky z předmětu Technická diagnostika: Přednáška 13. [online]. [cit. 2015-12-19]. *Tribotechnická diagnostika*. Dostupné z: <https://moodle.czu.cz/>
- [20] Ústav technologie ropy a alternativních paliv [online]. Neuveдено. [cit. 2015-09-20]. *Bod vzplanutí*. Dostupné z: <http://utrap.vscht.cz/files/uzel/0022643/215.1.2-Bod%20vzplanut%20%C3%AD,%20t%C5%99%C3%ADdy%20ho%C5%99lavosti.pdf>
- [21] ScienceDirect [online]. 1977. [cit. 2015-09-15]. *Predictive maintenance by ferrography*. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/0043164877900941>

- [22] ScienceDirect [online]. 2006. [cit. 2015-09-15]. *Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems*. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.infozdroje.czu.cz/science/article/pii/S0043164805002425>
- [23] Machinery lubrication [online]. [cit. 2015-10-16]. *Analytical Ferrography - Make It Work For You*. Dostupné z: <http://machinerylubrication.com/Read/5/analytical-ferrography>
- [24] Machinery lubrication [online]. Neuvedeno. [cit. 2015-12-10]. *LaserNet Fines - A New Tool for the Oil Analysis Toolbox*. Dostupné z: <http://www.machinerylubrication.com/Read/383/lasernet-fines-oil-analysis>
- [25] Spectro Scientific [online]. 2014. [cit. 2016-01-02]. *Lasernet fines® Q200-a solution to oil analysis including particle count and particle shape*. Dostupné z: <http://www.spectrosci.com/product/Inf-q200/?fileID=8a808189470570b30147da65195f1450>
- [26] Anton Paar [online]. 2011. [cit. 2016-01-01]. *SVM 3000 Viskozimetr podle Stabingera*. Dostupné z: <http://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=53280&L=4>
- [27] Teveso s.r.o. [online]. Neuvedeno. [cit. 2016-01-15]. *ROTAX 912 UL*. Dostupné z: <http://teveso.cz/motory/ctyrtaktni-necertifikovane/rotax-912-ul/>
- [28] Ship technology [online]. 2016. [cit. 2016-01-21]. *Spectro Scientific - Fluid Analysis and Measurement*. Dostupné z: [http://www.ship-technology.com/contractors/bunker\\_fuels/spectro-inc/spectro-inc6.html](http://www.ship-technology.com/contractors/bunker_fuels/spectro-inc/spectro-inc6.html)
- [29] Spectro INC [online]. Neuvedeno. [cit. 2016-01-22]. *Spectro FDM Q 600 Měřič ředění palivem (Fuel Sniffer)*. Dostupné z: <http://www.spectro.cz/store/spectrofdm-q600-fuel-sniffer.pdf>
- [30] Diram [online]. Neuvedeno. [cit. 2016-02-02]. *Coulometer WTD pro stanovení vody*. Dostupné z: <http://www.diram.cz/wp-content/uploads/CoulometerWTD.pdf>
- [31] Spectro INC [online]. Neuvedeno. [cit. 2016-03-02]. *Laboratorní ferograf Spectro T2FM Q 500*. Dostupné z: <http://www.spectro.cz/store/ferrograf-spectrot2fm-q500-ferrograf.pdf>

- [32] Tribotechnika [online]. Neuvedeno. [cit. 2016-03-02]. *Ferografie jako účinná metoda technické diagnostiky leteckých turbínových motorů - 1. Část*. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12016/ferografie-jako-ucinna-metoda-technicke-diagnostiky-leteckych-turbinovych-motoru-1-cas.html>
- [33] Lecture from subject Aircraft Systems [online]. Neuvedeno. [cit. 2016-03-12]. *Wet sump oil system*. Dostupné z: <http://documents.mx/documents/cessna-system.html>
- [34] Continental Motors, Inc. [online]. [03/2012]. [cit. 2016-03-14]. *200 Series*. Dostupné z: [http://www.continentalmotors.aero/uploadedfiles/content/xhome/billboards/200series\\_032012-web.pdf](http://www.continentalmotors.aero/uploadedfiles/content/xhome/billboards/200series_032012-web.pdf)
- [35] ČSN EN ISO 2719. *Stanovení bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku podle Penskyho-Martense*. ÚNMZ, 9/2004.

## Seznam obrázků

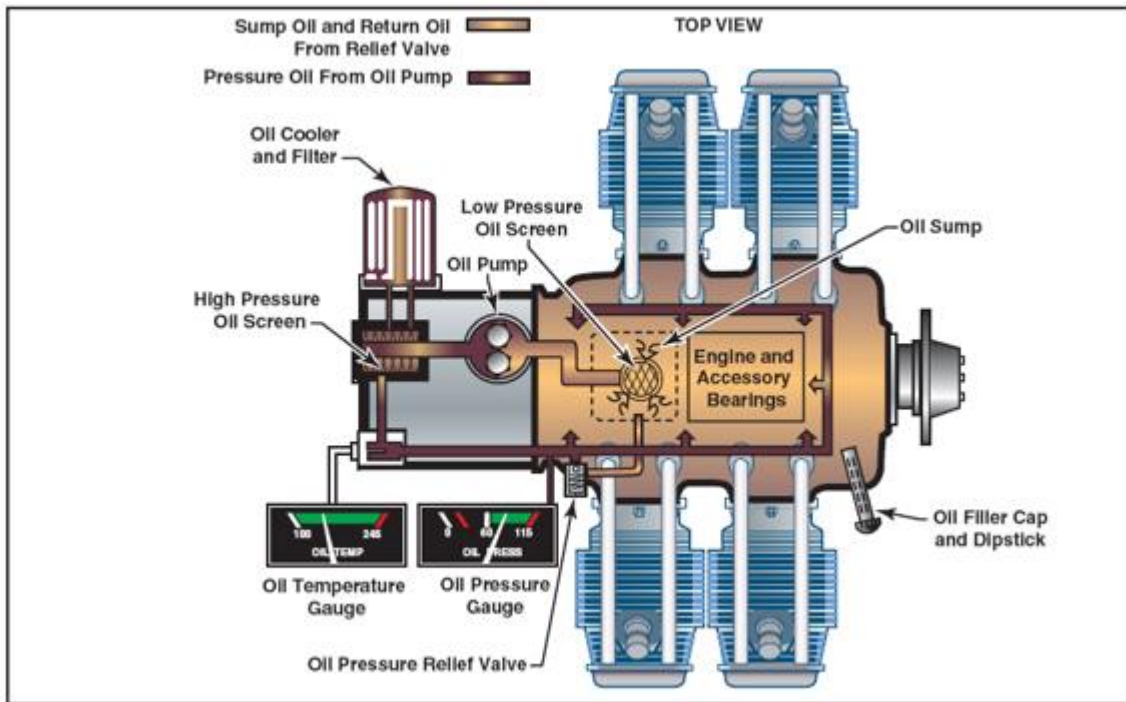
<i>Obrázek 1 Schéma mazací soustavy řadového motoru [3]</i> .....	3
<i>Obrázek 2 Kombinovaný ukazatel tlaku oleje, tlaku paliva a teploty oleje [4]</i> .....	4
<i>Obrázek 3 Závislost kinematické viskozity na teplotě oleje [10]</i> .....	8
<i>Obrázek 4 Doporučené viskozitní třídy SAE mot. olejů podle vnějších teplot (°C) [11]</i> .....	9
<i>Obrázek 5 Převodní tabulka [4]</i> .....	10
<i>Obrázek 6 Obecný průběh poškození vlivem opotřebení [5]</i> .....	14
<i>Obrázek 7 Vliv obsahu paliva na viskozitu oleje [15,19]</i> .....	16
<i>Obrázek 8 Princip ferografu [23]</i> .....	21
<i>Obrázek 9 Technická data Cessna 150 [6]</i> .....	25
<i>Obrázek 10 Technická data Atec 122 Zephyr</i> .....	26
<i>Obrázek 11 Viskozimetr SVM 3000 [26]</i> .....	27
<i>Obrázek 12 Fuel Sniffer [28]</i> .....	28
<i>Obrázek 13 Princip funkce LNF [24]</i> .....	30
<i>Obrázek 14 Rozřazovací klíč LNF [25]</i> .....	30
<i>Obrázek 15 Coulometer WTD [30]</i> .....	31
<i>Obrázek 16 Přístroj pro stanovení bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku [20]</i> .....	32
<i>Obrázek 17 Spectro T2FM Q500 a bichromatický mikroskop [31]</i> .....	33
<i>Obrázek 18 Princip vzniku ferografické stopy [32]</i> .....	34
<i>Obrázek 19 Příklad konkrétního odběrného štítku</i> .....	35
<i>Obrázek 20 Kinematická, dynamická viskozita a hustota oleje Aeroshell OILSPORT PLUS 4 v závislosti na motohodinách [autor]</i> .....	36
<i>Obrázek 21 Kinematická, dynamická viskozita a hustota oleje Aeroshell oil W 15W-50 v závislosti na letových hodinách [autor]</i> .....	37
<i>Obrázek 22 Obsah paliva v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]</i> .....	38
<i>Obrázek 23 Obsah paliva v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]</i> .....	39

<i>Obrázek 24 Absolutní počet částic v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]</i> .....	40
<i>Obrázek 25 Kód čistoty v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]</i> .....	41
<i>Obrázek 26 Počet částic &gt; 20 μm v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]</i> .....	42
<i>Obrázek 27 Procentní podíl druhu opotřebení v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]</i> .....	42
<i>Obrázek 28 Průměrná velikost částic v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]</i> .....	43
<i>Obrázek 29 Absolutní počet částic v Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]</i> .....	44
<i>Obrázek 30 Kód čistoty v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]</i> .....	45
<i>Obrázek 31 Počet částic &gt; 20 μm v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]</i> .....	46
<i>Obrázek 32 Procentní podíl druhu opotřebení v oleji Aeroshell OILSPORTPLUS 4[vlastní]</i>	46
<i>Obrázek 33 Průměrná velikost částic v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]</i> .....	47
<i>Obrázek 34 Procentní podíl vody v oleji Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [vlastní]</i> .....	48
<i>Obrázek 35 Procentní podíl vody v oleji Aeroshell oil W 15W-50 [vlastní]</i> .....	48
<i>Obrázek 36 Snímek adhezivních částic ferografické stopy [vlastní]</i> .....	52
<i>Obrázek 37 Vstupní část ferogramu [vlastní]</i> .....	52
<i>Obrázek 38 Snímek únavové částice [vlastní]</i> .....	53
<i>Obrázek 39 Snímek únavové částice po přiblížení [vlastní]</i> .....	53

## Seznam příloh

Příloha 1 Olejový systém letadla Cessna 150 [33] .....	1
Příloha 2 Technické hodnoty motoru Continental O-200-A [34].....	2
Příloha 3 Technické hodnoty motoru Rotax 912 UL [27] .....	3
Příloha 4 Technická data motoru Rotax 912 UL [27] .....	4
Příloha 5 Vlastnosti oleje Aeroshell oil W 15W-50 [10] .....	5
Příloha 6 Vlastnosti oleje Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [10].....	6

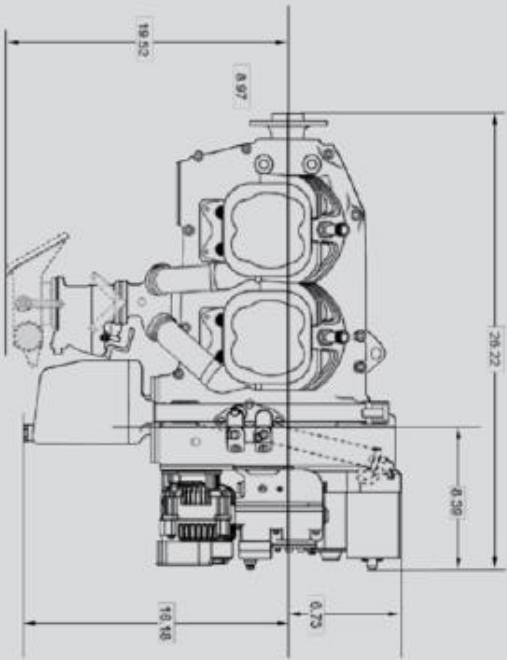
# Příloha 1 Olejový systém letadla Cessna 150 [33]







# 200 SERIES



### Engine Specifications

**Maximum Horsepower:** 95 to 125  
**Maximum Rated RPM:** 2750 to 2800  
**Cylinders:** 4  
**Bore / Stroke (inches):** 4.06/3.88 (200) / 4.44/3.88 (240)  
**Compression Ratio—Naturally Aspirated:** 7.0:1 (200) / 8.5:1 (2000D & 240)  
**Fuel System:** Continental Fuel Injection or Carburetion  
**Dry Weight (pounds):** 170, 18 to 205  
**Height (inches):** 23, 18 to 23.5  
**Width (inches):** 31, 56 to 31.4  
**Length (inches):** 28, 53 to 29.8  
**Turbo Model Available:** No  
**Hours to TBO:** 1800 to 2000

Model	Cylinders	METO Power HP@RPM	Bore & Stroke	Displacement Cubic Inches	Dry Weight		Fuel Grade	Comp. Ratio	TBO Hours/Years
					Including Accessories	Fuel Grade			
O-200-AF	4	95 @ 2750	4.06 X 3.88	200	199	Unleaded AV	7.0:1	2000/12	
O-200-A & B	4	100 @ 2750	4.06 X 3.88	200	224	80/87	7.0:1	1800/12	
O-200-DX	4	100 @ 2750	4.06 X 3.88	200	199	100/100LL	8.5:1	2000/12	

Model	Cylinders	METO Power HP@RPM	Bore & Stroke	Displacement Cubic Inches	Dry Weight		Fuel Grade	Comp. Ratio	TBO Hours/Years
					Including Accessories	Fuel Grade			
IO-240-A & B	4	125 @ 2800	4.44 X 3.88	240	240	100/100LL	8.5:1	2000/12	
IOF-240-B	4	125 @ 2800	4.44 X 3.88	240	248	100/100LL	8.5:1	2000/12	

## Příloha 3 Technické hodnoty motoru Rotax 912 UL [27]

ENGINE TYPE 912 | 80 hp (UL/A/F)

**ROTAX.**  
AIRCRAFT ENGINES



### DESCRIPTION

- 4-cylinder
- 4-stroke liquid/air-cooled engine with opposed cylinders
- dry sump forced lubrication with separate oil tank, automatic adjustment by hydraulic valve tappet
- 2 carburetors
- mechanical fuel pump
- dual electronic ignition
- electric starter
- propeller speed reduction unit

### FACTS

This series was BRP's first Rotax engine dedicated for aircraft application only. The Rotax 912 series is well regarded for its reliability and efficiency and is primarily targeted as the entry level engine in the light aviation industry. The 80 hp version of the Rotax 912 series offers a time between overhauls of 2.000 hours and is available as non-certified (Rotax 912 UL) as well as certified version according to FAR 33 (Rotax 912 F) and JAR 22 (Rotax 912 A).

### ENGINE DATA

WEIGHT	kg	lb
engine with propeller speed reduction unit (i = 2.27 (opt. i = 2.43))	55.4	122.0
overload clutch	1.7	3.7
exhaust system	4.0	8.8
external alternator	3.0	6.6
engine suspension frame	2.0	4.4
air guide hood	0.8	1.8
airbox	1.3	2.8

VERSION	PERFORMANCE			TORQUE			MAX RPM
	kW	ft. lb.	1/min	Nm	ft. lb.	1/min	1/min
912 UL <sup>1)</sup> /F <sup>2)</sup> /A <sup>3)</sup>	59.6	80	5800	103	75.9	4800	5800

Limited for max. 5 min.

BORE		STROKE		DISPLACEMENT		FUEL
79.5 mm	3.13 in	61 mm	2.4 in	1211.2 cm <sup>3</sup>	73.91 cu. in.	min. MON 83 RON 91* min. AVG 87*

\* leaded, unleaded, AVGAS 100LL or Ethanol 10

- 1) UL = non certified
- 2) F = certified acc. to FAR 33,
- 3) A = certified acc. to JAR 22.

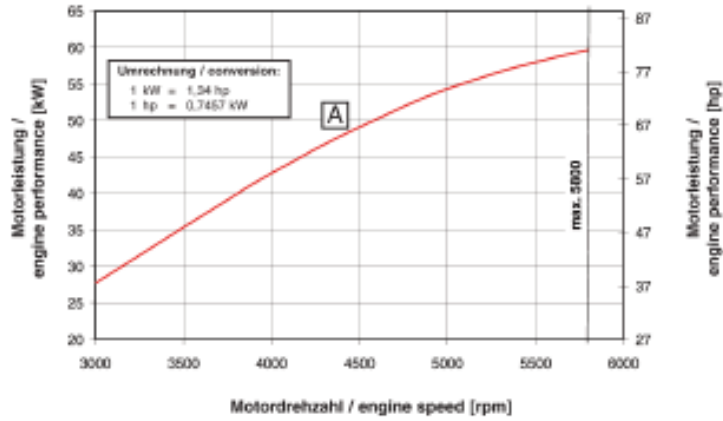
Picture 912 UL - DDDI with options

[www.flyrotax.com](http://www.flyrotax.com)

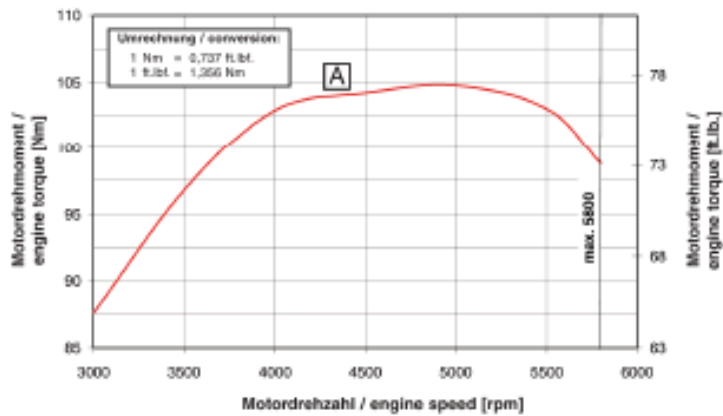
\* and TM are trademarks of BRP-Powertrain GmbH & Co. KG / © 2013 BRP-Powertrain GmbH & Co. KG / All rights reserved.



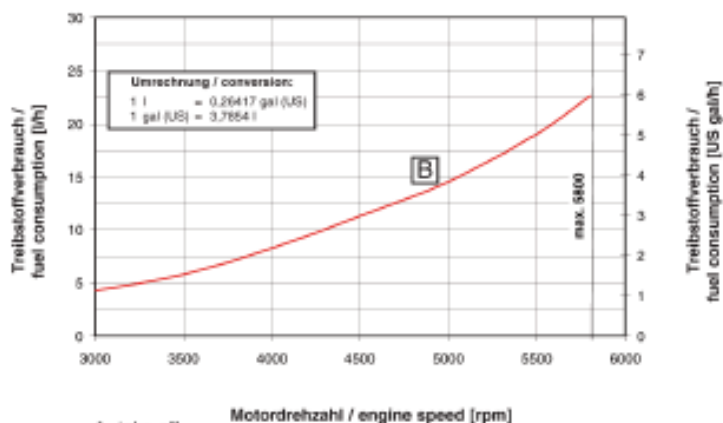
**MOTORLEISTUNG / ENGINE PERFORMANCE**



**MOTORDREHMOMENT/ ENGINE TORQUE**



**TREIBSTOFFVERBRAUCH / FUEL CONSUMPTION**



A: take off  
B: propeller curve

## Příloha 5 Vlastnosti oleje AeroShell oil W 15W-50 [10]

PISTON ENGINE OILS

3.18

### SPECIFICATIONS

AeroShell Oil W 15W-50 was developed in co-operation with Textron Lycoming and Continental Motors and conforms to their specifications 301F and MHS.24A respectively. This oil is also approved under Military Specification MIL-L-22851 which is now obsolete and has been replaced by the SAE J.1899 specification. AeroShell Oil W 15W-50 is also approved for use in all Pratt & Whitney radial aircraft engines. In addition AeroShell Oil W 15W-50 meets the provisions of Lycoming Service Bulletin 446C and 471 plus Service Instruction 1409A and meets the American FAA Airworthiness Directive 800403 which specifies special antiwear requirements for certain engine models.

AeroShell Oil W 15W-50 already contains, in the correct proportions, an antiwear additive equivalent to the Lycoming additive LW 16702; operators who use AeroShell Oil W 15W-50 DO NOT need to add this Lycoming additive to the oil.

AeroShell Oil W 15W-50 is qualified for use in all Continental Motors' liquid cooled and air cooled aircraft piston engines.

<b>U.S.</b>	Approved SAE J1899 Grade Multigrade
<b>British</b>	Approved SAE J1899 Grade Multigrade
<b>French</b>	-
<b>Russian</b>	-
<b>NATO Code</b>	O.162 Obsolete
<b>Joint Service Designation</b>	OMD.162

### EQUIPMENT MANUFACTURERS APPROVALS

AeroShell Oil W 15W-50 is approved for use by the following engine manufacturers:

<b>Textron Lycoming</b>	301F Service Bulletins 446E and 471B Service Instruction 1409C
<b>Continental</b>	MHS 24A SIL 992
<b>Pratt &amp; Whitney</b>	Service Bulletin 1183S
<b>FAA</b>	Airworthiness Directive 800403 R2

Typical Properties	SAE J.1899 Multigrade	Typical
Oil type	-	Mixed synthetic hydrocarbon and mineral
SAE viscosity grade	Multigrade	Multigrade
Colour ASTM	-	4.0
Density @ 15°C	Report	0.86
Kinematic viscosity @ 100°C	-	19.6
@ 40°C	-	14.0
Viscosity index	100 min	157
Pourpoint	Report	-39
Flashpoint Cleveland Open Cup	220 min	238
Total acidity mgKOH/g	1.0 max	0.01
Sulphur %m	0.6 max	0.2
Copper corrosion 3 hrs @ 100°C	1 max	1
3 hrs @ 204°C	3 max	2
Ash content %m	0.011 max	0.006
Trace sediment	Must pass	Passes
Foaming tendency	Must pass	Passes
Elastomer compatibility AMS 3217/1 72 hrs @ 70°C	Must pass	Passes
AMS 3217/1 72 hrs swell %	Must pass	Passes
AMS 3217/4 72 hrs @ 150°C swell %	Must pass	Passes
Trace metal content	Must pass	Passes
Compatibility	Must pass	Passes

A viscosity/temperature chart is shown at the end of this section. This product is made in more than one location and the approval status and typical properties may vary between locations.

PISTON ENGINE OILS

3.18

## Příloha 6 Vlastnosti oleje Aeroshell OILSPORT PLUS 4 [10]

<b>Typical Properties</b>	<b>Sport Plus 4</b>
SAE viscosity grade	Multigrade 10W-40
Density @ 15 °C      kg/l	0.871
Kinematic viscosity    mm <sup>2</sup> /s @ 100 °C	14.46
@ 40 °C	94.2
Viscosity index	159
Pourpoint                °C	-33
Flashpoint Cleveland Open Cup                °C	228