



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# KONCENTRACE SLOŽEK PLASTICKÉHO MAZIVA V EHD KONTAKTU A JEHO OKOLÍ

CONCENTRATION OF GREASE CONSTITUENTS IN THE EHD CONTACT AND ITS SURROUNDINGS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miroslav Palán

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2024



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Miroslav Palán**  
Studijní program: Konstrukční inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Koncentrace složek plastického maziva v EHD kontaktu a jeho okolí

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Plastická maziva se používají pro mazání ložisek mnohem častěji než oleje. Vzhledem k jejich reologii je nicméně složité studovat, jak se jednotlivé složky plastického maziva podílí na mazání a kdy je jejich význam podstatný. Již je známo, že v nízkých valivých rychlostech se na tvorbě mazacího filmu více podílí zpevňovadlo, nicméně to zatím nebylo přímo pozorováno.

Typ práce: výzkumná  
Výstup práce: publikační výsledek (J, D)  
Projekt: GAČR

### Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je poskytnout kvantitativní popis podílu složek plastického maziva na tvorbě mazacího filmu za různých podmínek.

Dílčí cíle diplomové práce:

- rešerše mechanismů mazání plastickými mazivy,
- návrh experimentů, příprava vzorků,
- kalibrace pro kvantitativní pozorování,
- realizace experimentů, závěry, vyhodnocení.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

### Seznam doporučené literatury:

LUGT, Piet M. Grease lubrication in rolling bearings. 1. Chichester: John Wiley, 2013. Tribology series. ISBN 978-1-118-35391-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce byla zaměřena na studium vlivu velikosti částice zpevňovačla a rychlosti na procentuální zastoupení složek plastického maziva (zpevňovačlo a základový olej) v kontaktu a jeho blízkém okolí. Kalibrační snímky byly pořizovány na modulu sandwich a experimenty probíhaly v konfiguraci ball-on-disk. Zastoupení jednotlivých složek v plastickém mazivu bylo zkoumáno pomocí fluorescenční mikroskopie umožňující separátní pozorování jednotlivých složek. Výsledky ukázaly že velikost částice zpevňovačla zásadně ovlivní jeho koncentraci v kontaktu a jeho blízkém okolí. Čím větší částice se v mazivu nachází tím větší je jeho zastoupení v kontaktu. Práce dále ukazuje vliv změny rychlosti na změnu koncentrace jednotlivých složek a spojitost přechodové rychlosti s jejich zastoupením. Práce přináší nový pohled na chování plastických maziv a poskytuje cenné poznatky pro vývoj a optimalizaci plastických maziv pro různé aplikace.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Plastické mazivo, zpevňovačlo, základový olej, částice, fluorescenční mikroskopie, EHD

## ABSTRACT

The thesis focused on the study of the effect of thickener particle size and speed on the concentration of grease particles (thickener and base oil) in the contact and its close surroundings. The calibration images were taken on a sandwich module and the experiments were carried out in a ball-on-disk configuration. The distribution of particles in the grease was investigated by fluorescence microscopy, which allows separate observation of the individual particles. The results showed that the particle size of the thickener fundamentally affects its concentration in and around the contact. The larger particle size is found in the lubricant, the higher is its concentration in the contact. The work also shows the effect of changing the velocity on the change in concentration of the individual components and the connection of the transition velocity with the distribution of the components. The work gives a new perspective on the behavior of greases and provides useful knowledge for the development and optimization of greases for different applications.

## KEYWORDS

Grease, thickener, base oil, particles, fluorescence microscopy, EHD



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PALÁN, Miroslav. *Koncentrace složek plastického maziva v EHD kontaktu a jeho okolí*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157398>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Košťál.



## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Davidovi Košťálovi, Ph.D. za cenné rady, jeho čas, ochotu a připomínky ke zpracování této diplomové práce. A Ing. Michalu Okálovi za pomoc při experimentech.

Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině, která mě již od mala silně podporovala ve všech mých zálibách a vzdělávání. I při studiu na vysoké škole byla celou dobu po mém boku a poskytovala mi silnou oporu.

V neposlední řadě bych chtěl touto formou poděkovat všem blízkým přátelům, kteří při mně stáli v dobách dobrých i zlých.

Děkuji.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Rešeršní metody	14
2.2	Kritická rešerše	15
2.2.1	Plastická maziva	15
2.2.2	Fluorescenční mikroskopie	22
2.3	Shrnutí hlavních zjištění	27
2.3.1	Plastické mazivo	27
2.3.2	Fluorescenční mikroskopie	28
2.4	Mezera v poznání	28
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>29</b>
3.1	Výzkumné otázky	29
3.2	Cíle výzkumu	29
3.3	Hypotézy	30
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>31</b>
4.1	Metodika	31
4.2	Experimentální zařízení a přístrojové vybavení	32
4.2.1	Aparatura měřicího zařízení	32
4.2.2	Modul	35
4.3	Materiál a testovací podmínky	36
4.3.1	Vzorky a jejich příprava	36
4.3.2	Podmínky experimentu	38
4.4	Metody	38
4.4.1	Výroba a kontrola plastického maziva Li-1-CP-worked	39
4.4.2	Flatfield korekce a eliminace signálu v pozadí	40
4.4.3	Metoda k odstranění parazitní fluorescence	41
4.4.4	Zastoupení složek plastického maziva	44
4.5	Testované predikce	50
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>51</b>
5.1	Kontrola nově vzniklého maziva Li-1-CP-worked	51
5.2	Parazitní fluorescence	53

5.2.1	Mazivo Li-1	53
5.3	Zastoupení složek plastického maziva	58
5.3.1	Vliv ulpívání částic na kuličce a disku	58
5.3.2	Mazivo Li-1-CP	59
5.4	Souhrn experimentálního pozorování	70
5.4.1	Přehledové obrázky	70
5.4.2	Přehledové grafy	71
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>74</b>
6.1	Interpretace výsledků	74
6.1.1	Kontrola nově vzniklého maziva	74
6.1.2	Parazitní fluorescence	75
6.1.3	Experimenty	76
6.1.4	Limitace	83
6.2	Verifikace hypotéz	84
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV</b>	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>88</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>92</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>94</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>97</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>98</b>

# 1 ÚVOD

Plastická maziva hrají klíčovou roli ve strojírenství, využití nachází především u valivých ložisek. Skládají se ze složky zpevňovačů a složky základového oleje s možností přidání speciálních aditiv zlepšujících jejich vlastnosti. Tyto maziva zajišťují nejenom mazání a dostatečné oddělení dvou pohybujících se povrchů, ale také chrání strojní součásti před nečistotami, opotřebením a poškozením. Porozumění chování jednotlivých složek plastických maziv je klíčové pro optimalizaci výkonu strojů a prodloužení životnosti jejich dílů. Zastoupení jednotlivých složek v kontaktu a jeho blízkém okolí je jedním z klíčových faktorů ovlivňujících účinnost daného plastického maziva. Za nízké rychlosti k tvorbě tloušťky mazacího filmu totiž oleji, který je extrahován za pomoci smykových sil ze struktury zpevňovačů, napomáhají svojí velikostí samotné částice zpevňovačů.

Tato práce je zaměřena na studium procentuálního zastoupení jednotlivých složek plastického maziva v kontaktu a jeho blízkém okolí pomocí fluorescenční mikroskopie. Navržená metoda umožňuje detailní analýzu rozložení základového oleje a zpevňovačů v mazací vrstvě a porozumění jejich interakcím s povrchem kuličky a disku.

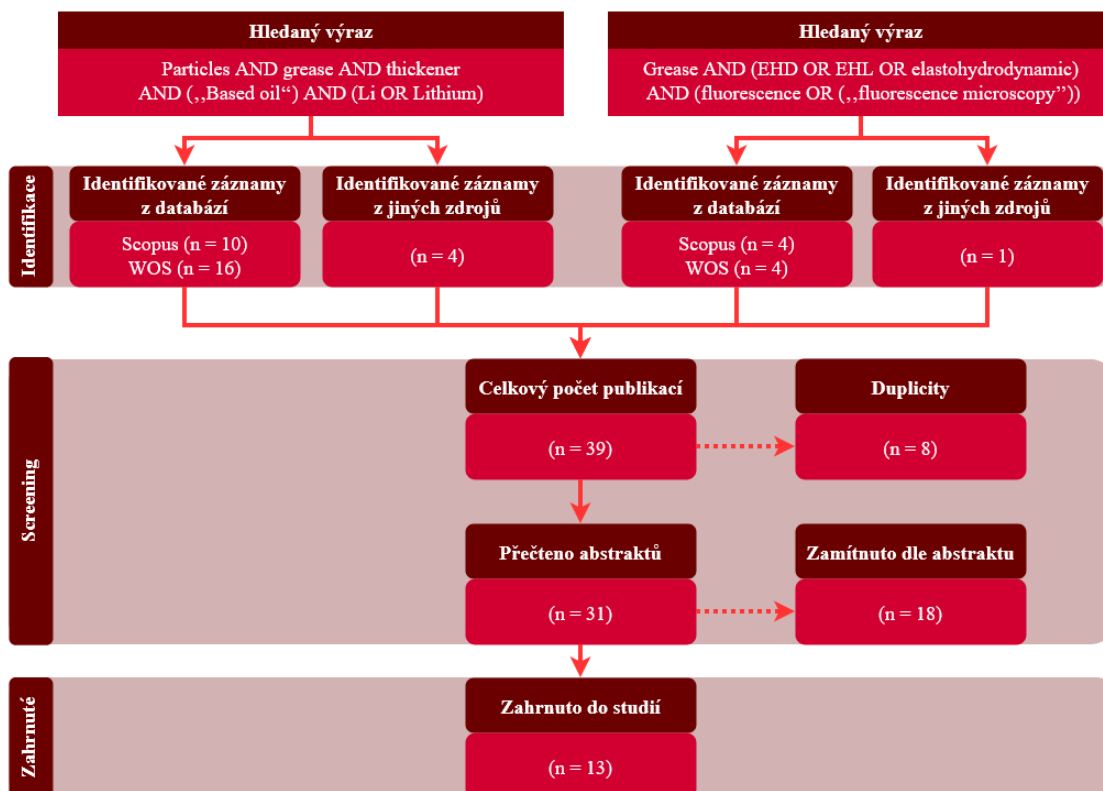
## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Rešeršní metody

Pro výzkum byla vybrána klíčová slova a k nim volena příslušná synonyma. Použití všech rešeršních požadavků vedlo k nalezení mnoha shod. S ohledem na vysoký počet shod byla zvolena metoda osekávání. Primárně byla využita databáze Scopus a Web of Science (WOS), ostatní zdroje byly vyhledány pomocí Google scholar a dalších platforem. K nalezení finálních zdrojů bylo použito dvou rešeršních požadavků, ty spolu s postupem vyhodnocování relevantnosti článků byly zobrazeny v Obr. 2-1. Při analýze článků byl též zohledněn h-index hlavního autora a IF publikujícího časopisu.

První rešeršní dotaz byl zaměřen především na složení plastických maziv, konkrétně na jeho částice (olej a zpevňovadlo) u maziv na bázi lithiového komplexu s použitím klíčových slov: Particles AND grease AND thickener AND („Based oil“) AND (Li OR Lithium).

Druhý rešeršní dotaz byl formulován s cílem získat informace o využití fluorescenční mikroskopie v elasto-hydrodynamickém kontaktu. Dotaz zněl: Grease AND (EHD OR EHL OR elasto-hydrodynamic) AND (fluorescence OR („fluorescence microscopy“)). Celkově bylo po odstranění duplicit a irelevantních článků získáno 13 publikací, ze kterých byla provedena kritická rešerše.



Obr. 2-1 PRISMA diagram

## 2.2 Kritická rešerše

### 2.2.1 Plastická maziva

Plastická maziva definoval **Hutton et al.** [1] jako „pevnou až polotekutou látku, popř. disperzi pevné složky zahušťovadla a tekuté složky základového oleje“, s možností přidání různých látek tzv. aditiv zlepšujících jejich vlastnosti. Při výrobě maziva dochází k přisypání složky zahušťovadla do oleje za zvýšené teploty, přičemž se začne formovat struktura zpevňovadla. Základový olej se uvnitř struktury zpevňovadla udrží pomocí kapilárních a Van der Waalsových sil [2], kdy tuto strukturu tvoří velmi mnoho vláken zpravidla o délce 1-100  $\mu\text{m}$ , přičemž délkový poměr k průměru nabývá hodnoty 10-100 [3].

Plastická maziva jsou nejrozšířenějším mazivem v ložiskových aplikacích (až 90 % všech ložisek je mazáno tímto mazivem [3]), dokáží totiž vytvořit několikanásobně větší mazací vrstvu než samotný základový olej v nich obsažený [3–7]. Přesto všechny prvotní testy a predikce byly stanoveny na základových olejích [8–10], pro jejich jednoduchost, neboť chování plastických maziv je velmi komplexní a silně ovlivněno reologickými vlastnostmi. Mezi hlavní úkol maziv patří od sebe oddělit dva pohybující se povrchy, tak aby bylo zamezeno vzájemnému tření a tím bylo sníženo jejich opotřebení.

Tato kapitola nejprve popisuje úvod k tvorbě mazací vrstvy, která odděluje jednotlivé povrchy v režimu EHD při plně zaplavených podmínkách, popř. v hladovění kontaktu. Poté se zaměřuje na problematiku mazání plastickými mazivy, včetně jejich principů a charakteristické tloušťky, kterou dokáží vytvářet. A nakonec byla zmíněna i řada parametrů ovlivňujících reologické vlastnosti samotného plastického maziva a jeho struktury.

#### Elasto-hydrodynamické mazání (EHD/EHL)

Jedná se o optimální režim mazání, který odděluje dva různé povrchy mazivem. Nejčastěji se tento režim vyskytuje u valivých ložisek, převodovek a vačkových mechanismů. Hlavní podstatou tohoto mazání je elastická deformace způsobená vysokými kontaktními tlaky při styku těchto dvou těles. Takto vysoké tlaky obvykle způsobují zvýšení teploty, což ovlivňuje viskozitu mazacího média, jež separuje kontaktní povrchy [8].

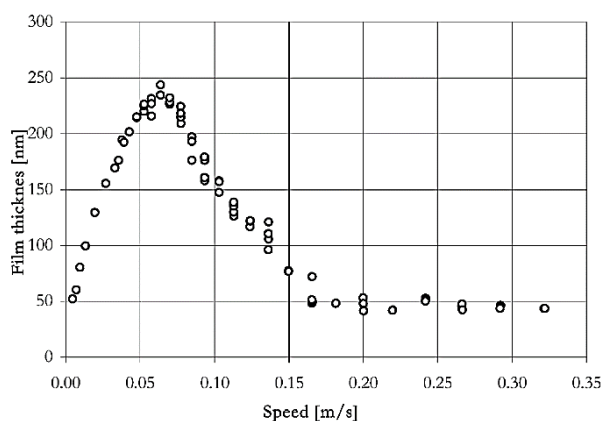
V procesu mazání mohou nastat dva případy [8]:

- Plně zaplavené podmínky – Jedná se o optimální stav, ve kterém se do kontaktu dostává dostatečné množství lubrikantu, aby se třecí povrchy dostatečně oddělily. Při těchto podmínkách se tloušťka mazací vrstvy zvyšuje spolu s rychlostí při zkoumání oleje [11]. Při provádění experimentů se většina studií zaměřuje právě na tyto plně zaplavené podmínky [4–7, 12–22].

- Hladovění – Jedná se o méně žádoucí stav, kdy do kontaktu není dodáváno dostatečné množství maziva natolik, aby se povrchy od sebe dostatečně oddělily. Při těchto podmínkách se při zkoumání olejových vzorků se zvyšující se rychlostí snižuje tloušťka mazací vrstvy [11].

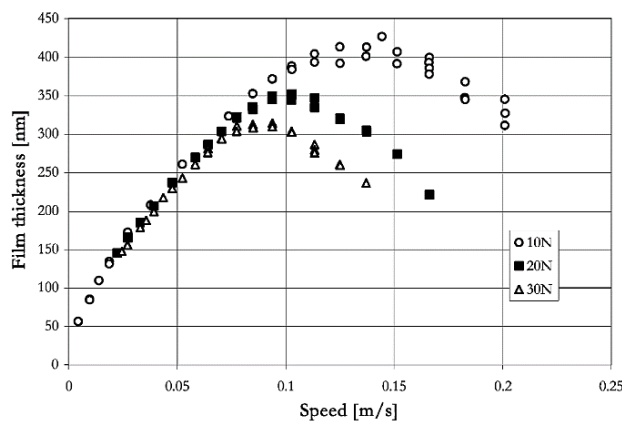
Studie **Cann et al.** [10] zjistila že na hladovění kontaktu má vliv řada parametrů, která byla dále shrnuta a rozvedena ve studii **Lugt et al.** [3, 8]:

- Provozní rychlost – Za nízké rychlosti ložisko vždy operuje v plně zaplavených podmínkách, neboť se v okolí dráhy nachází dostatečně velké množství maziva, které může vstoupit do kontaktu. Při zvýšení rychlosti dochází k navýšení odstředivých sil, které mohou mazivo vytlačit mimo dráhu ložiskových kuliček, tj. do okolí, a tím způsobit hladovění [3, 10]. Plně zaplavené podmínky pro základový olej byly zobrazeny na Obr. 2-2 do rychlosti 65 mm/s, poté kontakt začíná hladovět a tloušťka mazacího filmu postupně klesá, dokud nedojde do stavu plného hladovění.



Obr. 2-2 Tloušťka mazacího filmu jako funkce rychlosti pro vzorek oleje [10]

- Provozní zatížení – Zvýšení kontaktního tlaku, který působí v kontaktu ovlivní viskozitu média, studie **Cann et al.** [10] uvádí nepatrnou změnu v tloušťce filmu u plně zaplavených podmínek. Zásadní vliv má změna provozního zatížení v případě hladovění, kdy toto zatížení navíc dokáže zvětšit kontaktní oblast.

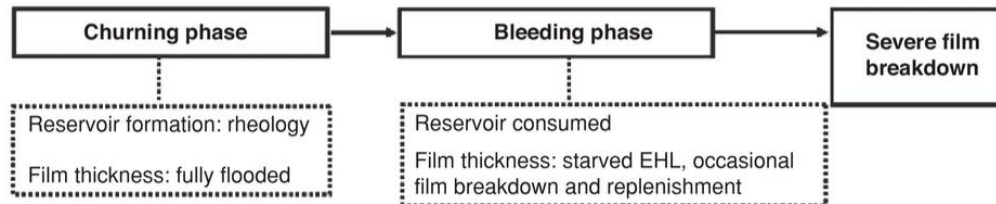


Obr. 2-3 Tloušťka mazacího filmu jako funkce rychlosti v závislosti na zatížení pro vzorek oleje [10]

- Viskozita maziva – Ovlivňuje celkový tok maziva v kontaktu a jeho okolí spolu se schopností mazat (viz další podkapitola).
- Objem použitého maziva – Prostor ložiska se zpravidla vyplní z 30 % plastickým mazivem. Po prvním průchodu ložiska se část objemu usadí v jeho volné geometrii (kapsy, klec, vnitřní prostory mimo dráhu ložiskových kuliček) a nadále se vůbec neúčastní procesu mazání [3].

### Mechanismus mazání

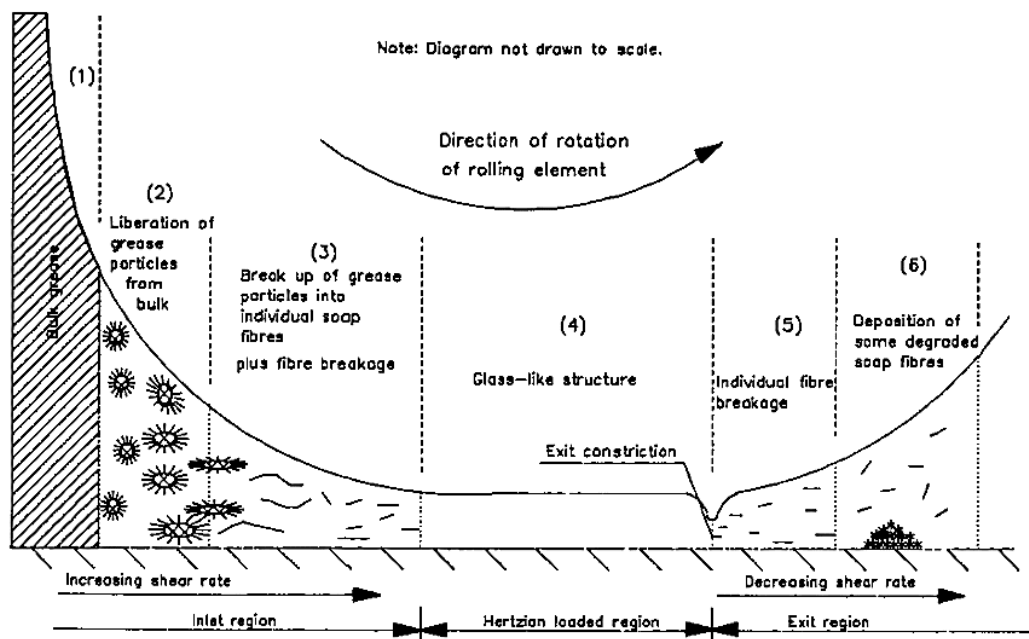
Proces mazání plastickými mazivy v ložisku může být rozdělen do tří fází [3].



Obr. 2-4 Fáze procesu mazání v ložisku [3].

Při zapnutí stroje prvně nastává churning fáze. Tato fáze, která obvykle trvá až 24 h (v závislosti na objemu maziva, jeho reologii a provozních otáčkách), zahrnuje tok maziva v geometrii ložiska. Během této fáze se zvyšuje teplota součástí. S teplotou roste i moment tření, což vede ke změně reologie maziva. V této fázi nedochází k výraznému hladovění kontaktu.

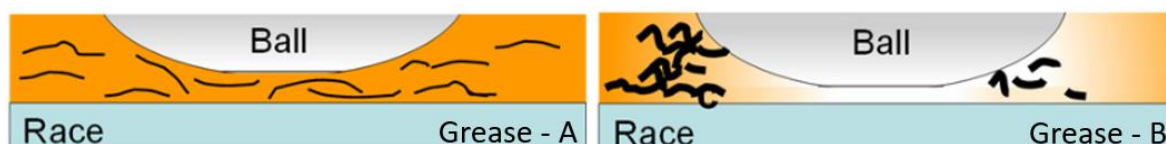
Následuje bleeding fáze, během které ložisko již spotřebuje veškerý olej ve struktuře plastického maziva a v dráze se nachází pouze mazivo degradované. Začíná se vyskytovat časté hladovění, což vede k přechodu do třetí fáze, kdy dochází ke zničení celkové vrstvy filmu a k poškození jednotlivých povrchů [3].



Obr. 2-5 Schéma formování filmu plastickými mazivy [12]

Plastická maziva vytvářejí mazací vrstvu několika možnými způsoby:

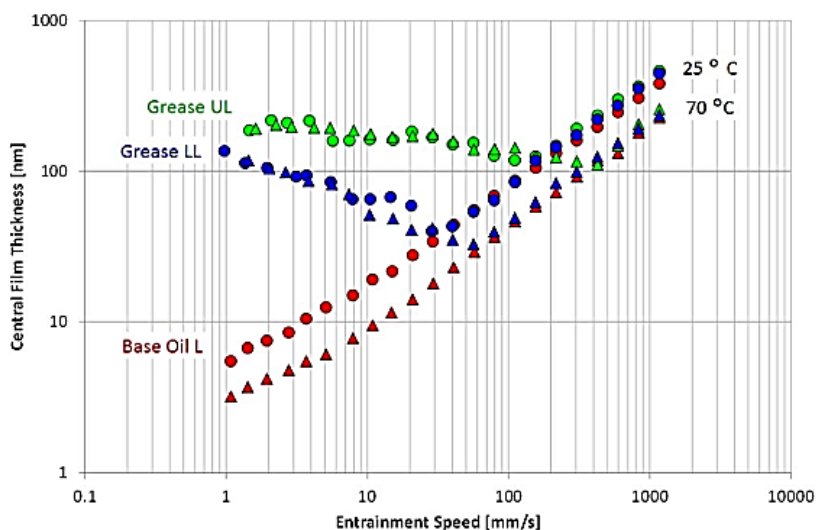
- Primárně dochází při chodu stroje k vysokým třecím silám, které zvyšují síly smykové. Tyto síly dokáží z maziva díky bleeding schopnostem, jež udává jeho schopnost odolávat smykovému namáhání, uvolňovat základový olej a tím vytvářet mazací vrstvu [3]. Studie **Cann et al.** [12] ukazuje detailní vliv těchto sil (viz. Obr. 2-5). Zvyšující se smyková rychlost vede ke zjemnění částic zpevňovačů v oblasti menisku až do zcela jemných vláken, které tvoří homogenní vrstvu spolu se základovým olejem, extrahovaným ze zjemněných částic. Pokud částice nebyly ve správné orientaci se směrem pohybu (v oblasti vyšší rychlosti), měly tendenci kontaktem neprojit a odsunout se do okolí. Po průchodu Hertzovou kontaktní oblastí docházelo k shromáždění jednotlivých mechanicky degradovaných vláken v okolí a dráze za kontaktem. **Rezasoltani et al.** [23] zkoumal vliv degradace na jednotlivé vlastnosti maziva. Přestože mazivo po průchodu ztratí svoji konzistenci a stane se jemnější, dokáže po určitou dobu dále vytvářet dostatečně velkou mazací vrstvu, díky zvýšení jeho bleeding hodnotě. Takto poničené mazivo však již nedokáže ve své struktuře nadále udržovat olej a začne postupně vysychat a tvrdnout.
- Pomocí působení vysokého tlaku je možné totálně rozbít mikrostrukturu zpevňovačů a tím extrahovat olej do kontaktu [3].
- Zvyšování tloušťky filmu pomocí částic zpevňovačů. **Sakai et al.** [13, 20] a **Cyriac et al.** [7] zkoumali vliv velikosti částic na tloušťku vytvořené mazací vrstvy. Pokud mazivo obsahuje malé částice zpevňovačů Obr. 2-6 (Grease – A) může tvořit větší mazací vrstvu díky schopnosti jednotlivých vláken snáze projít skrz kontakt a tím zvýšit jeho tloušťku. Naopak u maziva s velkými částicemi zpevňovačů (Grease – B) dochází (při stejných provozních podmínkách) k menší tloušťce mazací vrstvy. Velké částice mají tendenci spíše kontakt obtékat, což nepřispívá k zvyšování tloušťky filmu. Dále bylo zjištěno, že kontaktem v průběhu měření prochází 1 – 70 % zpevňovačů obsaženého v mazivu [7].



Obr. 2-6 Mechanismus mazání pomocí částic zpevňovačů [13] – převzato a upraveno

Plastická maziva jsou schopna vytvářet mazací vrstvy s tloušťkou několikanásobně větší než základový olej v nich obsažený, v oblastech s velmi nízkou rychlostí [3–7, 13, 14, 21].

Ve studii **Kanazawa et al.** [6] Obr. 2-7 byla zkoumána dvě plastická maziva, obsahující základový olej s označením L (červená). Mazivo na bázi lithiového komplexu bylo označeno LL (modrá) a mazivo na bázi močoviny UL (zelená). Oba typy maziv LL a UL dokázaly při nízké rychlosti vytvořit mazací film s větší tloušťkou než jejich základový olej L. Se zvyšováním rychlosti se však tloušťka mazacího filmu tvořená plastickým mazivem vyvíjela se záporným gradientem až k bodu rychlosti přechodu (transition speed), též bodu zlomu „V“, od kterého začala tloušťka stoupat a přibližovat se hodnotám samotného základového oleje L. Tato rychlost přechodu „V“ je ovlivněna provozní teplotou (kolečka 25 °C, trojúhelník 70 °C) a druhem použitého zpevňovačla (LL, UL) [4, 6].



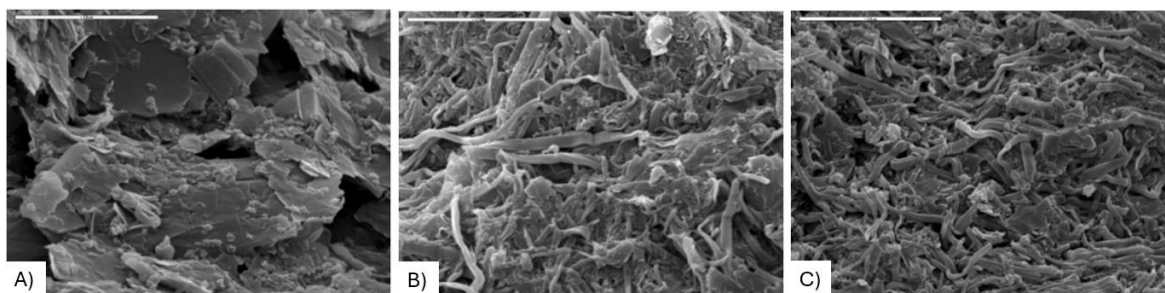
Obr. 2-7 Graf tloušťky mazací vrstvy v závislosti na rychlosti [6]

Další vývoj tloušťky mazací vrstvy při vysokých rychlostech okolo 3 000 mm/s byl zkoumán v práci **Zhang et al.** [4]. Ukázalo se, že tloušťka filmu se za vyšší rychlosti vyvíjí obdobně jako u základového oleje. Nicméně po dosažení 3 000 mm/s došlo k ustálení tloušťky mazací vrstvy na stabilní hodnotě. Toto ustálení může být způsobeno naplněním kapacity prostoru kontaktu, který by mohl být zcela zaplněn zpevňovačem.

## Reologie maziva

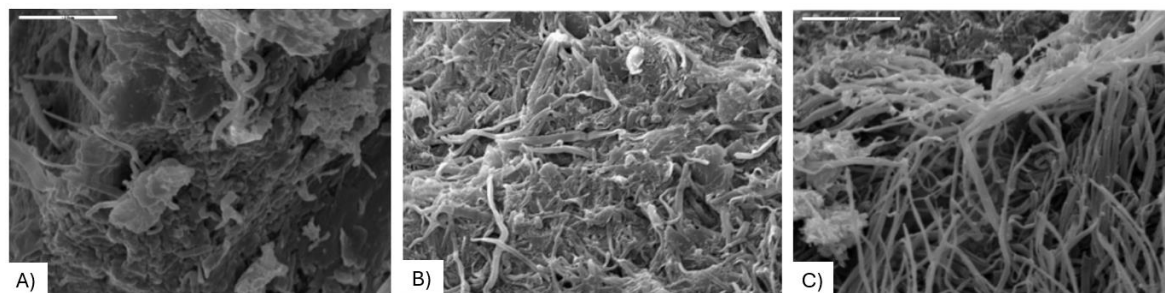
Plastická maziva prokazují velmi specifické a složité chování při tvorbě mazací vrstvy. Mezi hlavní parametry ovlivňující toto chování patří druh a množství použitého zpevňovačla, jakož to i druh a viskozita základového oleje [4–6, 13, 16, 21].

Druh a koncentraci zpevňovačla zkoumaly studie **Hodapp et al.** [16] a **Delgado et al.** [21]. Hlavním parametrem ovlivňujícím celé mazivo je koncentrace dané složky zpevňovačla. S rostoucí koncentrací zpevňovačla se zvyšuje viskozita a lineární visko-elastická. Tím se též zvyšuje mechanická stabilita maziva a jeho schopnost uvolňovat základový olej ze struktury. Při přidání zpevňovačla do oleje o stejné viskozitě dochází ke změně velikosti a struktury částic spolu s jeho rostoucím obsahem. Pro koncentraci 8 hm.% Obr. 2-8 (A) mazivo vytvoří velké pláty zpevňovačla. Při navýšení koncentrace složky zpevňovačla dochází ke zjemnění struktury a navýšení viskozity maziva. Od koncentrace 11 hm.% se již struktura (velikost a délka vláken) nemění a dochází pouze ke změně komplexní viskozity maziva.



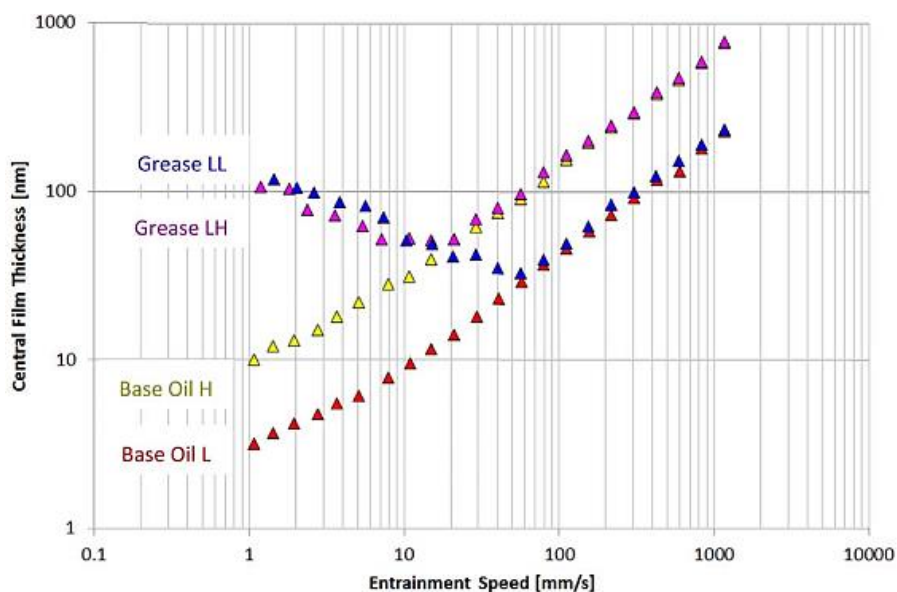
Obr. 2-8 Mikrostruktura plastického maziva pro olej o kinematické viskozitě 334 cSt při různé koncentraci zpevňovačla: A) 8 hm.%, B) 14 hm.%, C) 20 hm.% [21]

Dalším parametrem, který ovlivňuje tvar a délku jednotlivých částic zpevňovačla, je viskozita základového oleje. Ta navíc ovlivňuje vzdálenost mezi jednotlivými vytvořenými vlákny [21]. Obr. 2-9 znázorňuje rozdíl ve vzniklých mikrostrukturách olejů o různých viskozitách při stejné koncentraci zpevňovačla (14 hm.%). Olej s nejnižší viskozitou vytváří hrubší strukturu (A), ve které jsou vlákna hustě uspořádána těsně vedle sebe. Naopak u maziva s olejem vyšší viskozity se tvoří velmi tenká vlákna, mezi nimiž je dostatečně velký prostor (C).



Obr. 2-9 Mikrostruktura plastického maziva pro zpevňovačlo o koncentraci 14 hm.% při různé kinematické viskozitě základového oleje: A) 11 cSt, B) 334 cSt, C) 657 cSt [21]

Viskozita základového oleje též ovlivní vývoj mazacího filmu za vyšší rychlosti. Ve studii **Kanazawa et al.** [6] bylo zjištěno, že viskozita oleje při použití stejného zpevňovačla na bázi lithiového komplexu (Obr. 2-10) za nízké rychlosti nemá zcela významný efekt na tloušťku mazací vrstvy, která v této oblasti spíše závisí na druhu použitého zpevňovačla. Nicméně, po překročení rychlosti přechodu začíná viskozita oleje ovlivňovat vytvořenou tloušťku mazací vrstvy. Například mazivo označené LL obsahovalo olej nízké viskozity (L), zatímco mazivo LH olej s vyšší viskozitou (H). Tato studie tedy ukazuje, že viskozita má vliv i na tloušťku mazací vrstvy v oblasti vyšší rychlosti.



Obr. 2-10 Graf mazací vrstvy v závislosti na rychlosti pro maziva o různých viskozitách oleje [6]

Druh základového oleje též ovlivnil velikost a tvar jednotlivých částic zpevňovačla. Minerální olej byl schopen vytvořit velmi jemná a dlouhá vlákna, což napomáhalo k větší tloušťce filmu. Bohužel je tento olej pro běžné používání v plastických mazivech poměrně drahý. Jeho levnější syntetická alternativa je polyalfaolefinový olej tvořící tlustší a kratší vlákna zpevňovačla. To vede k vytvoření vrstvy o něco menší, než kterou dokázal vytvořit minerální základový olej [4, 13].

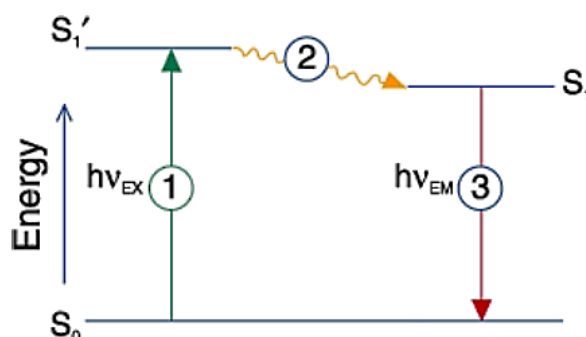
## 2.2.2 Fluorescenční mikroskopie

Tato práce využívá fluorescenční mikroskopii k pozorování jednotlivých složek plastického maziva. V práci **Palán** [24] byla zjištěna možnost sledování jednotlivých částic v kontaktu separátně na aparátu ball-on-ring. Pro využití fluorescenční mikroskopie, obvykle využívané v biologii, bylo nutné obarvit vzorky speciálními fluorescenčními barvivy. Přičemž tento postup umožňuje pozorování látek, jako je plastické mazivo, které samo o sobě nemá fluorescenční schopnosti.

Tato kapitola 2.2.2 nejprve probírá základní principy fluorescenční mikroskopie a následně poskytuje přehled použitých fluorescenčních barviv k označení jednotlivých složek plastického maziva. Nakonec se zabývá vlivem reabsorpce emise.

### Princip fluorescenční mikroskopie

K možnosti využití fluorescenční mikroskopie je základní podmínkou, aby vzorek obsahoval organické či anorganické sloučeniny schopné fluorescenčního záření. Tuto schopnost umožňují molekuly fluoroforu, jež dokáží absorbovat energii dodávanou fotonem a následně ji opět uvolnit ve formě dalšího světla [25]. V případě, že látka neobsahuje molekuly fluoroforu, je nutné tyto částice uměle dodat, např. pomocí rozmíchání fluorescenčního barviva v látce. Průběh fluorescenčního jevu rozdělila do tří fází práce **Haugland et al.** [26] Obr. 2-11:



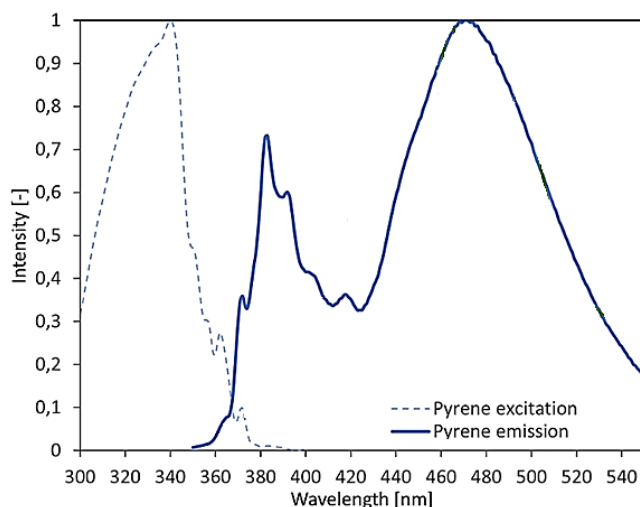
Obr. 2-11 Fluorescenční princip [26]

1. Fluorescenční excitace – Jedná se o proces, při kterém dochází k přechodu fluoroforu ze stavu nenabuzeného ( $S_0$ ) do stavu nabuzeného ( $S_1'$ ) pomocí absorpce energie ( $h\nu_{EX}$ ) fotonů z externího zdroje. Tento proces se nejčastěji provádí pomocí externích světelných zdrojů, např. UV lamp, či laserového zdroje, které emitují světlo s krátkými vlnovými délkami. Tyto vlnové délky dokáží nabudit elektrony fluoroforu, a tak je přesunout na vyšší orbitalovou dráhu.

2. Životnost nabuzeného stavu – Po absorpci energie od fotonů se nabuzená částice snaží rychle zrelaxovat a uvolnit tuto získanou energii. V takto silně nabuzeném stavu elektron vydrží typicky 1 až 10 ns, kdy tuto doba především ovlivní další stejně nabitě částice v okolí. Fluorofor se snaží zrelaxovat a emitovat energii do okolí, což má za následek ovlivnění nabuzenosti ostatních fluoroforů. Část energie z nabuzené částice (o energii  $S_1'$ ) je disipována do okolí a částice se dostane do nižšího energetického stavu (o energii  $S_1$ ), ze kterého již začne emitovat fluorescenční záření.
  
3. Fluorescenční emise – Z nabuzeného stavu ( $S_1$ ) fluorofor relaxuje zpět do rovnovážného stavu ( $S_0$ ) prostřednictvím emitování energie ( $h\nu_{em}$ ) ve formě fotonu. Díky disipaci energie v nabuzeném stavu má emitované světlo nižší energetickou hodnotu a tím pádem i větší vlnovou délku. Rozdíl mezi energií dodanou zdrojem ( $h\nu_{ex}$ ) a energií emitovanou fluoroforem ( $h\nu_{em}$ ) se nazývá Stokesův posun. Stokesův zákon je základním principem fluorescenční mikroskopie, neboť umožňuje separátní pozorování světla emitovaného fluoroforem, zatímco světlo excitované zdrojem je odfiltrováno. Tento princip je realizován pomocí filtrů [27–29], které propouštějí emitované světlo a odrážejí světlo excitované.

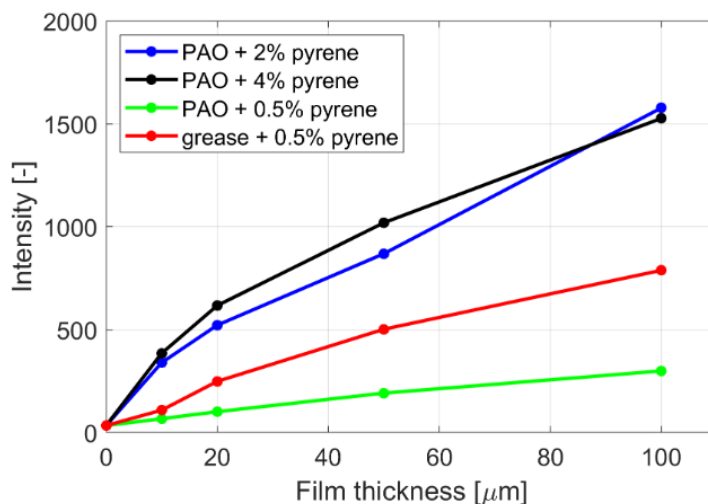
## Pyren

Tento aromatický uhlovodík poskytuje možnost využití fluorescenční mikroskopie pro studium plastických maziv a olejů [18]. V práci **Košťál et al.** [19] se toto barvivo samovolně navázalo výhradně na složku základového oleje. Excitační vrchol každého fluorescenčního barviva závisí na látce, ve které je rozpuštěno. Dosahuje několika excitačních a emisních maxim po křivkách Obr. 2-12. Přičemž se v této studii využilo excitačního maxima o vlnové délce 365 nm. Barvivo po excitaci touto vlnovou délkou emituje záření o maximální intenzitě při vlnové délce okolo 471 nm.



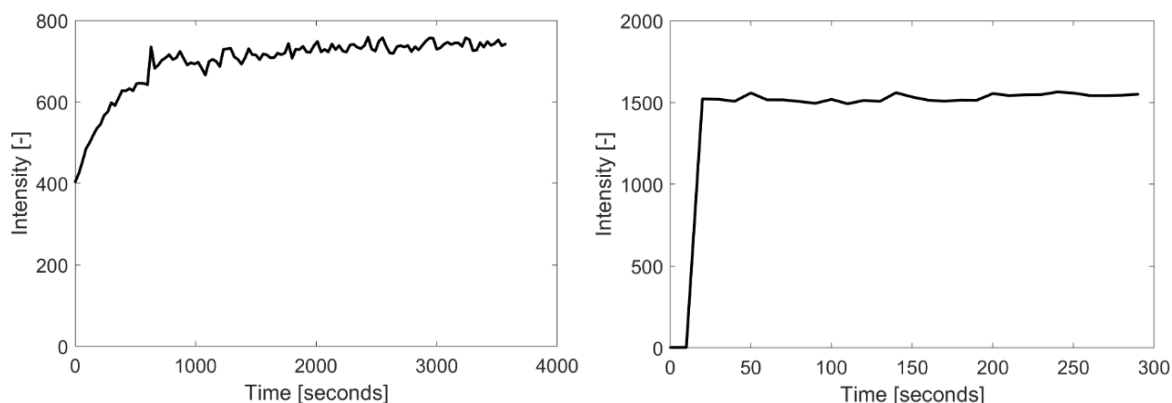
Obr. 2-12 Fluorescenční spektra pro barvivo pyren [19] (upraveno)

Studie **Košťál et al.** [18] dále řeší celkové vlastnosti tohoto barviva v různých koncentracích a mazivech. Byl zkoumán celkový vliv hmotnostního zastoupení pyrenu v mazivu na plochu pod získanou emisní křivkou. Obsah barviva navíc ovlivnil nejen získanou hodnotu intenzity světla, ale také její vývoj v závislosti na tloušťce mazacího filmu Obr. 2-13. Ze studie vyplývá, že optimálním vzorkem je mazivo obsahující 1 hm.% pyrenu.



Obr. 2-13 Fluorescenční intenzita po tloušťce filmu pro různé hmotnostní zastoupení barviva pyren [18]

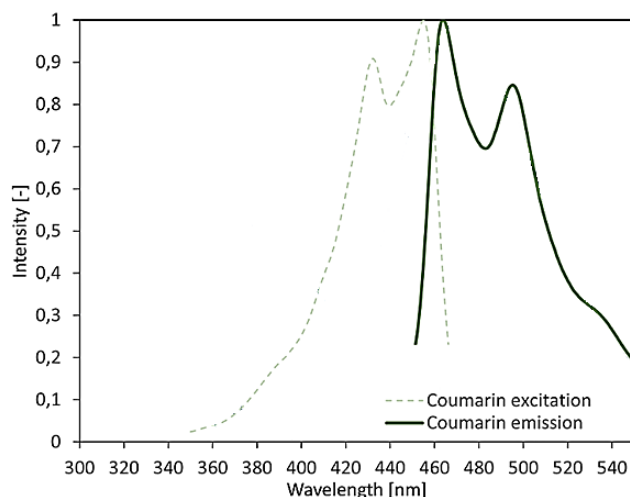
Pyren navíc prokázal velmi dobrou odolnost vůči photobleachingu. Jevu, při kterém se v průběhu času snižuje fluorescenční intenzita, tzn. že barvivo se časem vysvěcuje a ztrácí své fluorescenční schopnosti. Pyren vykazuje velmi dobrou odolnost v průběhu času, pouze s mírnými odchylkami Obr. 2-14 – vlevo. Z tohoto grafu dále vyplývá nestabilní chování intenzity barviva v krátkém časovém horizontu. Čím déle se na vzorek svítí tím vyšší intenzity dosahuje. Tyto odchylky eliminuje tzv. UV stabilizace (Obr. 2-14 – vpravo), jež spočívá v ozařování vzorku UV lampou po dobu cca 10 min. Po této úpravě vzorek dosáhne plné intenzity již po cca 10 s a následně si svoji intenzitu stabilně drží. Barvivo může být navíc vloženo do plastického maziva, aniž by se změnila jeho fluorescenční vlastnosti.



Obr. 2-14 Fluorescenční stabilita v čase u barviva pyren, vlevo bez UV stabilizace, vpravo s UV stabilizací [18]

## Coumarin

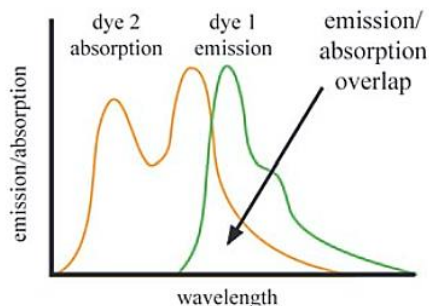
Coumariny jsou komerčně nejrozšířenějšími umělými fluorescenčními barvivy, jež ochotně absorbují světelné záření. V práci **Košťál et al.** [19] byl využit specifický coumarinu 6 schopný excitovat a emitovat záření ve dvou různých maximech viz. Obr. 2-15. Excitace fluoroforu probíhá za vlnové délky 415 nm a nabitě částice následně emitují záření v okolí 495 nm. Zkoumané vzorky obsahovaly 0,02 hm.% coumarinu, jež se jeví jako ideální množství pro sledování složky zpevňovačla v plastickém mazivu. Studie dále prokazuje samovolnou návaznost barviva coumarin na složku zpevňovačla, přičemž 95 % barviva se navázalo na složku zpevňovačla a zbylých 5 % barviva zůstalo volně ve struktuře maziva.



Obr. 2-15 Fluorescenční spektra pro barvivo coumarin [19] (upraveno)

## Reabsorpce emise

V případě, kdy bylo v jednom zkoumaném vzorku použito více barviv, docházelo při zkoumání jednoho barviva k ovlivnění i toho druhého. Práce **Hidrovo et al.** [30] uvádí vliv reabsorpce emise Obr. 2-16 dvou barviv (dye 1 a dye 2) a její celkovou charakteristickou problematiku. Absorpční a emisní křivky barviv znázorňují rozmezí vlnových délek ve kterých barvivo ochotně přijímá (dye 2 – oranžová), popř. emituje fotony (dye 1 – zelená). Jev reabsorpce nastane pouze v případě, pokud emisní křivka prvního barviva zasahuje do excitační křivky druhého barviva znázorněno na Obr. 2-16 jako overlap.



Obr. 2-16 Reabsorpce emise schéma [30]

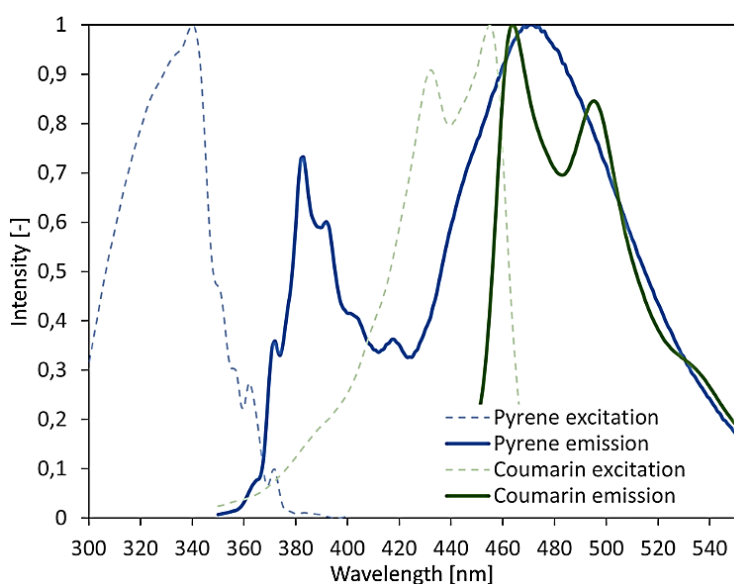
Při překrytí křivek dochází k ovlivnění a zkreslení získaných dat následujícími způsoby:

- Zvýšení fluorescenční intenzity – Emise fotonů jednoho barviva může excitovat barvivo druhé, čímž se zvýší získaná fluorescenční intenzita [30].
- Snížení fluorescenční intenzity – Více podstatná ztráta dat nastává v případě, kdy ve fázi nabuzeného stavu, fluorofor odevzdá velkou část své energie nenabuzenému fluoroforu barviva druhého. Původní fluorofor následně nedokáže díky odevzdané energii vyzářit foton a tím sníží celkově získaný signál daného barviva [30].

Pro použitá fluorescenční barviva pyren a coumarin byly jejich excitační a emisní křivky zaneseny do Obr. 2-17. V těchto zobrazených křivkách docházelo k velmi mnoha přechodovým oblastem, což může vést k možnému působení vlivu jednoho z druhů reabsorpce.

Dochází zde k překrytí emisní a excitační křivky samotného barviva pyren (modrá). Tzn. že emitované záření pyrenu může dále excitovat nové molekuly pyrenu a tím uměle navyšovat získanou fluorescenční intenzitu tohoto barviva. Tento obdobný jev může nastat i u barviva coumarin (zelená), neboť i toto barvivo vykazuje mírné překrytí své excitační a emisní křivky.

Druhý případ reabsorpce mohl nastat v důsledku překrytí emisní křivky pyrenu a excitační křivky coumarinu. Kdy emise barviva pyrenu dokáže excitovat fluorofory coumarinu a tím opět navýšit získaný fluorescenční signál. Zde navíc může docházet již ke zmíněnému samovolnému přechodu energie na coumarin a tím dojít ke snížení fluorescenční intenzity pyrenu.



Obr. 2-17 Fluorescenční spektra pro coumarin a pyren [19]

## 2.3 Shrnutí hlavních zjištění

### 2.3.1 Plastické mazivo

Plastická maziva jsou nejrozšířenějším lubrikantem v ložiskových aplikacích. Tyto maziva se skládají ze složky základového oleje, zpevňovačů a různých aditivních látek, které mu mohou poskytnout další různé vlastnosti (teplotní odolnost, smykovou odolnost atd.). Nicméně primární vliv na reologii maziva určuje základový olej spolu se zahušťovadlem [4, 16]. Základový olej se v mikrostruktuře maziva při výrobě především váže do vláken zahušťovačů, ze kterých musí být následně aplikován do kontaktu pomocí smykových sil [23].

Samotnou velikost a vzdálenost mezi těmito vlákny určuje kinematická viskozita oleje v mazivu [21]. Čím větší je viskozita oleje tím jsou vlákna menší a dál od sebe. Díky tomu se stane struktura maziva slabší a jeho hustota se sníží. Díky malým vláknům vznikne prázdný meziprostor, který se vyplní olejem. Přes vyplnění volného prostoru neovlivňuje zásadně viskozita oleje viskozitu výsledného plastického maziva. Ta je přímo závislá na koncentraci zpevňovačů při jeho výrobě [16, 21]. Vlastností, kterou však viskozita oleje dále zásadně ovlivňuje, je tloušťka mazací vrstvy za vysoké rychlosti. V této oblasti plastická maziva vytvářejí tloušťku filmu silně závislou na použitém základovém oleji [4, 6].

Komplexní viskozitu plastického maziva převážně ovlivňuje druh a množství použitého zpevňovačů [4, 16]. Čím vyšší koncentrace této složky se nachází v mazivu, tím vyšší viskozitu mazivo obsahuje. Zpevňovač hraje klíčovou roli při tvorbě mazací vrstvy při nízké rychlosti [4, 6, 7, 21]. Zde plastická maziva dokáží vytvořit několikanásobně větší mazací vrstvu než samotný základový olej v nich obsažený.

Přechod mezi dominantním vlivem zpevňovačů a základovým olejem se nazývá rychlost přechodu (transion speed), též „V” přechod. Tento jev je specifický pro každý druh zpevňovačů, viskozitu oleje a teplotu [6].

### 2.3.2 Fluorescenční mikroskopie

K využití fluorescenční mikroskopie je nutné používat průhledné médium. V konfiguraci ball-on-disk, používané k pozorování EHD kontaktu, se za tímto účelem používá skleněného disku nejčastěji z materiálu BK7 [18, 19, 22]. V práci **Palán** [24] byla prokázána možnost využití fluorescenční mikroskopie k pozorování jednotlivých částic plastického maziva. Studie **Košťál et al.** [18, 19] dále potvrdila téměř přímou návaznost barviva pyren na složku základového oleje a barviva coumarin na složku zpevňovadla. V případě využití dvou různých fluorescenčních barviv, jejichž křivky emise a excitace se překrývají, nastává problém reabsorpce emise, jež řeší studie **Hidrovo et al.** [30].

## 2.4 Mezera v poznání

V současné době se řada studií omezovala pouze na sledování tloušťky mazací vrstvy, kterou dokázala plastická maziva vytvořit. Byla zkoumána široká škála vzorků, odlišujících se ve viskozitě olejů, typů zpevňovadel, popř. jejich koncentrací v separátních člancích. Díky uvedeným studiím došlo k získání hlubšího porozumění chování tloušťky mazacího filmu u plastického maziva. Zejména v oblasti nízké rychlosti v závislosti na druhu použitého zpevňovadla, či viskozitě oleje pro rychlosti vyšší. Jak bylo zmíněno, všechny studie se omezovaly pouze na pozorování tloušťky mazací vrstvy bez znalosti složkového zastoupení zkoumaného maziva v kontaktu. Toto umožňuje fluorescenční mikroskopie, která díky separátnímu obarvení jednotlivých složek fluorescenčními barvivy dokáže dodat informaci o jejich zastoupení v kontaktu a blízkém okolí. Tuto metodu však doposud žádná z prací nepoužila, pouze její využití nastínila. V literatuře tedy chybí přímý kvantitativní popis zastoupení jednotlivých složek zpevňovadla a základového oleje v EHD kontaktu a jeho blízkém okolí.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Výzkumné otázky

- O.1: Jaká koncentrace složek plastického maziva (zpevňovadlo, základový olej) se nachází v EHD kontaktu a jeho blízkém okolí?
- O.2: Jak ovlivní změna rychlosti koncentraci jednotlivých složek?

### 3.2 Cíle výzkumu

Cílem diplomové práce bylo poskytnout kvantitativní popis podílu složek plastického maziva při tvorbě mazacího filmu v kontaktu a jeho blízkém okolí. Přičemž testy byly provedeny na tribometru v konfiguraci ball-on-disk. Měření probíhala opakovaně a za různých podmínek. Separátní pozorování složek plastického maziva bylo provedeno pomocí fluorescenční mikroskopie. Práce se především orientovala na plastické mazivo na bázi lithiového komplexu a mazivo na bázi močoviny.

Dílčí cíle diplomové práce:

- Rešerše mechanismů mazání plastickými mazivy
- Potvrzení lineárního chování mezi intenzitou světla a tloušťkou mazací vrstvy fluorescenčního barviva pyren
- Navržení vhodné konfigurace jednotlivých snímků
- Vývoj kalibrace pro kvantitativní pozorování
- Vyhodnocení koncentrace složek za různé rychlosti v a okolí kontaktu

Jedná se o výzkumnou práci s orientovaným základním kvantitativním výzkumem pomocí empirických výzkumných metod. Jednou z částí práce byl experimentální vývoj metody konfigurace a kalibrace jednotlivých snímků pro následné vyhodnocování. Přičemž matlab skript spolu s metodikou konfigurace a kalibrace tvoří výstup vývojové části. Práce se ubírala především výzkumným směrem. Vývojová část zaplnila maximálně 35 % práce.

### 3.3 Hypotézy

- H.1: V kontaktu se vytváří tloušťka filmu přímo závislá na složení maziva, jež ovlivňuje celkový mechanismus mazání spolu s jeho viskozitou. I přes to, že výrobce udává koncentrace jednotlivých složek při výrobě, v kontaktu se nachází odlišný poměr zpevňovadla k základovému oleji. Tato variabilita totiž závisí na celkové velikosti částice zpevňovadla a testovaných podmínkách. Pokud při testování maziva obsahujícího opravdu velké částice zpevňovadla nastane malá tloušťka mazacího filmu. Tak za stejných testovaných podmínek (rychlost, teplota a zatížení) u maziva s malými částicemi nastane tloušťka mazací vrstvy o něco vyšší [7, 13]. V případě výskytu velké částice zpevňovadla v malé vrstvě dojde k optickému navýšení procentuálního zastoupení této složky v oblasti a složka oleje se sníží z důvodu omezeného prostoru. Malé částice naopak budou tak nepatrné ve velké tloušťce filmu v porovnání s olejem, že se obsah zpevňovadla opticky zmenší, natolik že poklesne jeho procentuální zastoupení udané výrobcem.
- H.2: Za nízké rychlosti se předpokládá v kontaktu opticky větší obsah složky zpevňovadla, než udává výrobce. Na Obr. 2-7 (str. 19) je patrné, že za nízké rychlosti se modře označené lithiové mazivo a zeleně označené mazivo urea chovají odlišně od jejich čisté složky základového oleje označeného v grafu červeně. Plastická maziva tvoří tloušťku mazací vrstvy několikanásobně větší než základový olej, což může být způsobeno především zpevňovadlem [5, 6, 14]. Proto se předpokládá, že se zpevňovadlo bude v kontaktu nacházet v opticky vyšším zastoupení. Pro vyšší rychlosti se pozoruje podobné chování při tvorbě tloušťky filmu jak u plastického maziva, tak u základového oleje [5, 6, 14]. Proto by se základový olej měl nacházet v kontaktu ve vyšším zastoupení a nahradit tak složku zpevňovadla, která by se měla v kontaktu nacházet již v degradovaném stavu, popř. nedegradovaném v okolí kontaktu [3].

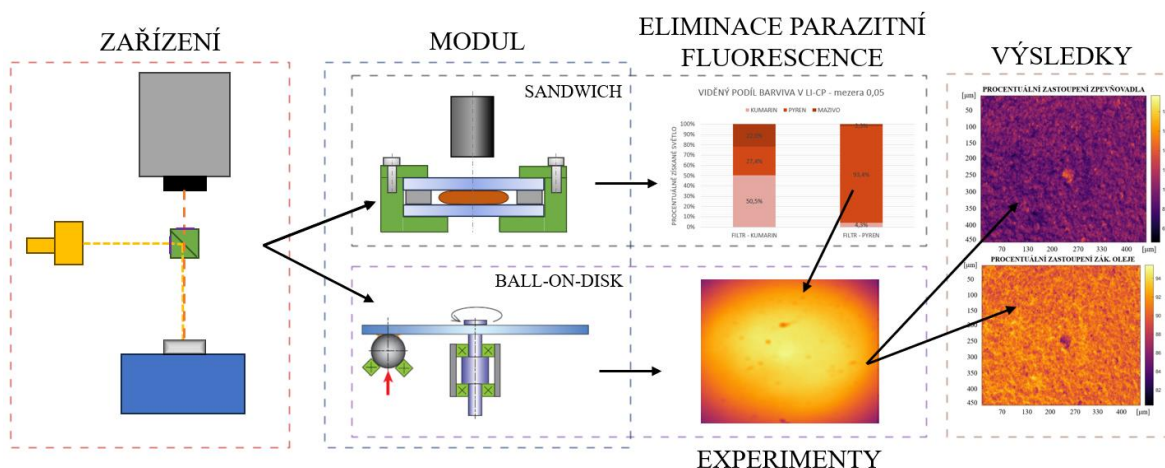
## 4 MATERIÁL A METODY

### 4.1 Metodika

Tato diplomová práce se zabývala relačním typem výzkumného problému. Byl použit kvantitativní výzkum za pomoci empirických vědeckých metod (experimentální pozorování koncentrace složek plastického maziva v závislosti na rychlosti a dalších parametrech). Průběh řešení byl zobrazen na schématu Obr. 4-1. Jako zařízení pro provedení hlavních experimentů byl použit fluorescenční mikroskop. V tomto mikroskopu se k pozorování plastického maziva následně nasadily dva moduly:

- Sandwich modul pro měření parazitní fluorescence
- Ball-on-disk modul pro hlavní experimenty

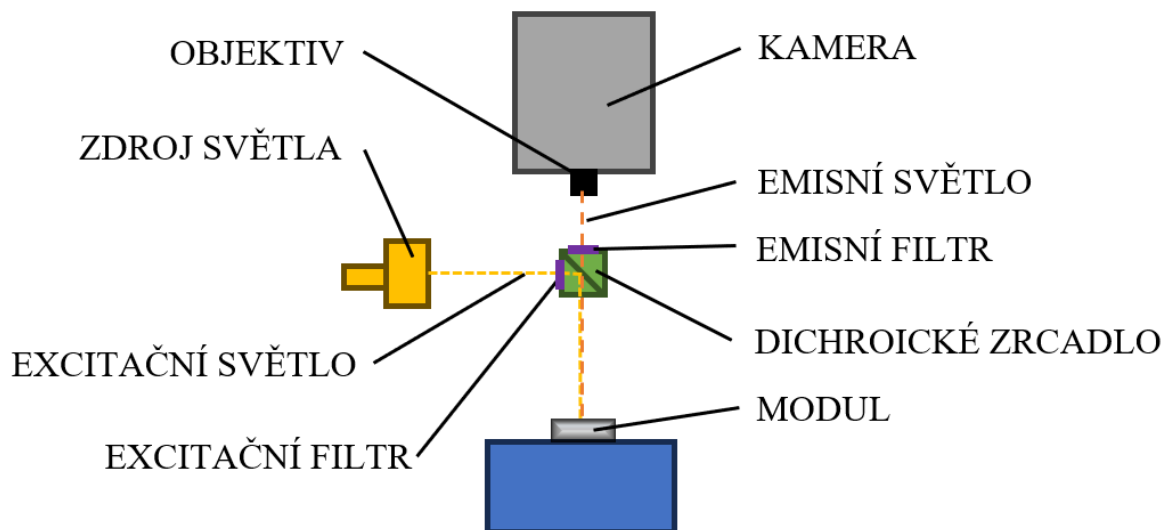
Pomocí dat z parazitní fluorescence bylo korigováno provedené experimentální měření a tím se následně dosáhlo aktuálního procentuálního zastoupení jednotlivých složek v kontaktu.



Obr. 4-1 Schéma postupu práce

## 4.2 Experimentální zařízení a přístrojové vybavení

### 4.2.1 Aparatura měřícího zařízení



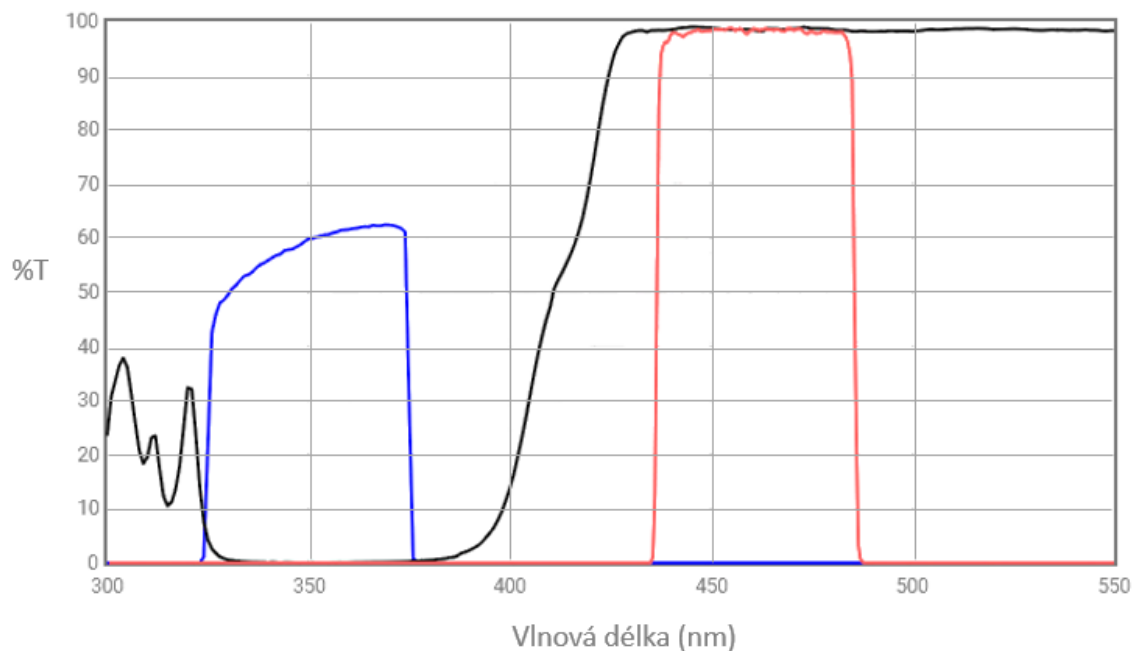
Obr. 4-2 Schéma měřící aparatury

Aparatura umožňující provedení experimentů byla složena z:

1. Kamera
  - a. Citlivá monochromatická kamera Andor Neo 5.5 sCMOS [31] s velikostí pixelu  $6,5 \mu\text{m}$  a se snímáním v 16-bitovém režimu.
  - b. Citlivá monochromatická kamera FL-20BW TUCSEN [32] s velikostí pixelu  $2,4 \mu\text{m}$  a snímáním v 16-bitovém režimu. Se schopností zachytit signál ve velmi tmavém prostoru
2. Objektiv [33]
  - a. LU Plan fluor 5x/0,15
  - b. LU Plan fluor 10x/0,3
  - c. LU Plan fluor 20x/0,5
3. Dichroické zrcadlo – Zařízení obsahující speciální optický filtr umožňující odrazit světlo o určité excitační vlnové délce a propustit světlo o dané emisní vlnové délce [29].
  - a. ET-DAPI-49000 [28] – k pozorování barviva pyren
  - b. AT-Aqua-Longpass-19001 [27] – k pozorování barviva coumarin

4. Světelný zdroj
  - a. LED zdroj THORLABS SOLIS-365C [34] – pro barvivo pyren
  - b. LED zdroj THORLABS M415L4 [35] – pro barvivo coumarin
  
5. ND filtry – Filtr umožňující zeslabení intenzity světla umístující se před světelný zdroj
  - a. ND4 – zeslabení světla 4x
  - b. ND8 – zeslabení světla 8x
  - c. ND16 – zeslabení světla 16x
  
6. Modul – viz. kapitola 4.2.2
  - a. Sandwich
  - b. Ball-on-disk

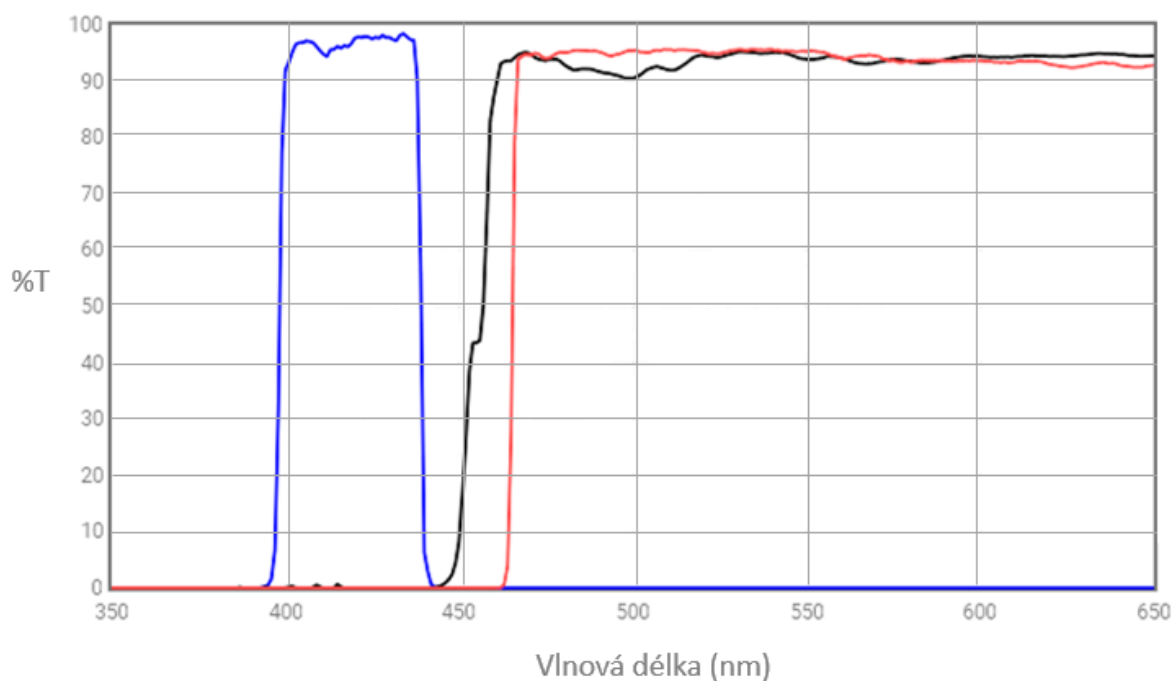
K pozorování barviva pyren bylo použito světelného zdroje THORLABS SOLIS-365C [34] emitujícího světlo o dominantní vlnové délce 365 nm a filtru ET-DAPI-49000 [28], Obr. 4-3. Dále v práci se kombinace těchto dvou komponent označovala jako aparatura pro pyren viz. tab. 4-1.



Obr. 4-3 Propustnost filtru ET-DAPI-49000 [28]

K pozorování barviva coumarin se použilo světelného zdroje THORLABS M415L4 [35] emitujícího světlo o nominální vlnové délce 415 nm a filtru AT-Aqua-Longpass-19001 [27], Obr. 4-4. Dále v práci byla kombinace těchto dvou zařízení označena jako aparatura pro coumarin viz. tab. 4-1.

Na Obr. 4-3 a Obr. 4-4 modrá barva značila pracovní rozmezí excitační vlnové délky, kterou dokázal filtr propustit. Červená barva značila rozmezí emisní vlnové délky a barva černá vlnovou délku, kterou filtr dokázal odrazit pod úhlem 45°.



Obr. 4-4 Propustnost AT-Aqua-Longpass-19001 [27]

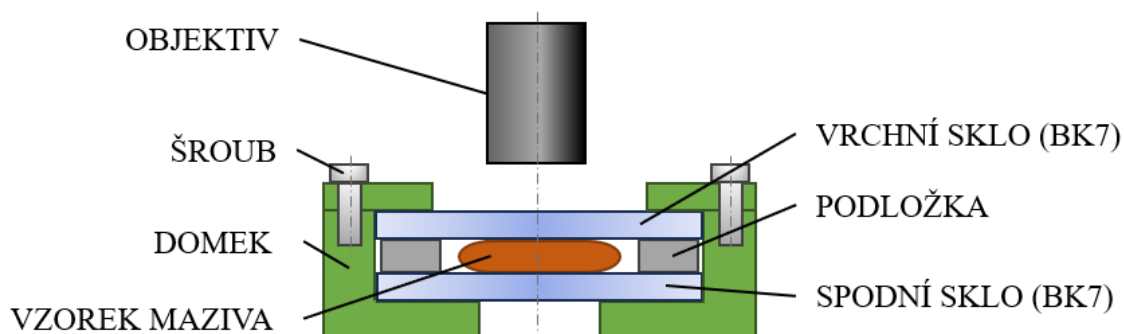
tab. 4-1 Přehled nového označení používaných součástí

Nové označení	Zahrnuje aparaturu	
	Filtr	LED ZDROJ
Aparatura pro pyren	ET-DAPI-49000	THORLABS SOLIS-365C
Aparatura pro coumarin	AT-Aqua-Longpass-19001	THORLABS M415L4

## 4.2.2 Modul

### Sandwich

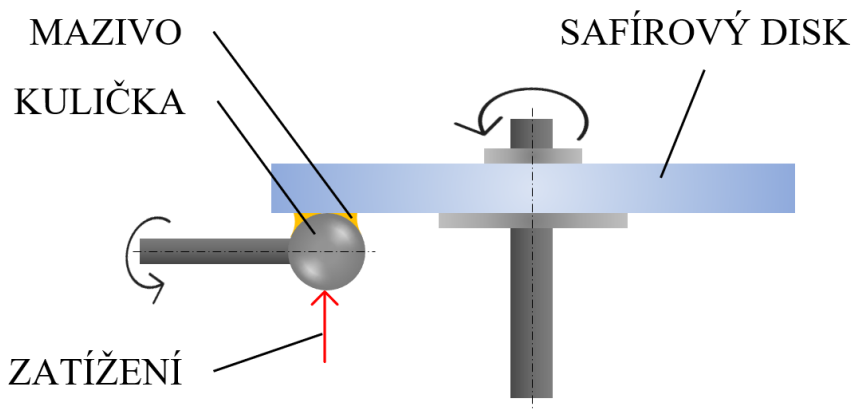
Tento modul byl využit pro vyhodnocení parazitní fluorescence v kombinaci s již zmíněnou aparaturou. Mazivo se zde vkládalo do mezery mezi dvěma kulatými sklíčky (ze skla BK7), jež vznikala díky vložené podložce. Zatížení na kontakt se vyvozovalo pomocí šroubového spojení.



Obr. 4-5 Modul Sandwich

### Ball-on-disk

Modul byl použit pro experimentální zjištění koncentrace jednotlivých složek plastického maziva v kontaktu. Měřicí aparatura zůstala zachována, pouze byl vyměněn modul za ball-on-disk. Jednalo se o konfiguraci, při které do kontaktu přichází kulička spolu s rotujícím diskem. Zatížení bylo do kontaktu přenášeno pomocí odstupňovaného závaží, které se připevnilo přes páku na straně kuličky, která byla vyrobena z kuličkové oceli 100Cr6 a dosahovala průměru 25,4 mm. Dále byl před kuličku vložen stírač (zařízení umožňující setření maziva z plochy disku zpět do dráhy kuličky), který zajišťoval rovnoměrné dodávání plastického maziva do kontaktu a tím zabraňoval jeho hladovění.



Obr. 4-6 Modul Ball-on-disk

## 4.3 Materiál a testovací podmínky

### 4.3.1 Vzorky a jejich příprava

Ke zkoumání byla připravena plastická maziva a olej japonskou firmou ENEOS. Jako základní složka plastických maziv byl použit polyalfaolefinový olej spolu se specifickým zahušťovadlem. Jako zahušťovadlo bylo přidáváno do tohoto oleje mýdlo na bázi lithiového komplexu (mazivo neslo označení Li-1) tvořící vlákna o šířce 100 – 150 nm, popř. mýdlo na bázi močoviny ve dvou zastoupeních (mazivo neslo označení Urea1 a Urea2) tvořící vlákna o šířce 40 – 80 nm. Zahušťovadlo v Urea1 vytvářelo v mazivu velmi hrubou mikrostrukturu, zatímco v Urea2 naopak strukturu velmi jemnou. Navíc pro prvotní testy byl využit i samotný základový olej PAO8 jež nevykazuje známky autofluorescence [19]. Složení jednotlivých vzorků shrnula následující tabulka.

tab. 4-2 Hmotnostní poměr složek pro přípravu maziva

Druh maziva	Označení	Základový olej PAO8	Zahušťovadlo
Mazivo na bázi lithiového komplexu	Li-1	84 %	16 %
Mazivo na bázi močoviny	Urea1	85 %	15 %
Mazivo na bázi močoviny	Urea2	85 %	15 %
Základový olej	PAO8	100 %	0 %

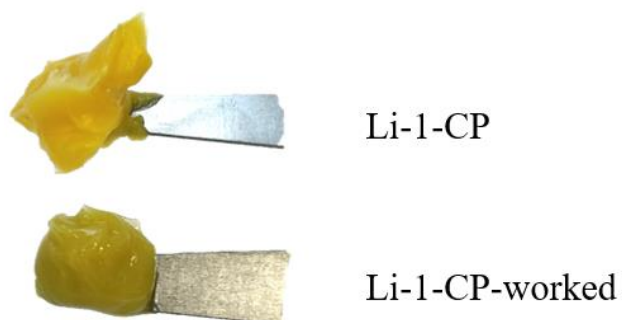
Výroba zmíněných plastických maziv probíhala za zvýšené teploty. Do základového oleje PAO8, jež vzorky plastických maziv obsahovaly, byla vmíchána požadovaná fluorescenční barviva, jež měl daný vzorek obsahovat. Fluorescenční barvivo pyren se volně rozpustilo v základovém oleji a po přidání složky zahušťovadla se barvivo coumarin rozpustilo v nově vzniklé struktuře zpevňovadla.

Pro každé mazivo byly vyrobeny 4 vzorky viz. tab. 4-3. Pokud obsahovaly pouze barvivo coumarin nesly označení (C), pokud pouze pyren značily se (P). Pokud mazivo obsahovalo obě fluorescenční barviva coumarin a pyren značilo se (CP) a mazivo bez barviv zůstalo bez označení. V tab. 4-3 bylo přehledně zobrazeno jednotlivých vzorků.

tab. 4-3 Označení jednotlivých vzorků maziv

Druh maziva	Coumarin	Pyren	Coumarin a pyren	Bez barviva
Mazivo LI-1	Li-1-C	Li-1-P	Li-1-CP	Li-1
Mazivo Urea1	Urea1-C	Urea1-P	Urea1-CP	Urea1
Mazivo Urea2	Urea2-C	Urea2-P	Urea2-CP	Urea2
Olej PAO8	PAO8-C	PAO8-P	PAO8-CP	PAO8

Zmíněné plastické mazivo Li-1-CP obsahovalo velmi hrubé částice zpevňovadla. Z důvodu studie vlivu velikosti částic na koncentraci složek v kontaktu a bližšímu přiblížení k mazivu, jež se mechanicky degradované nachází v reálném ložisku se pro experimenty nechalo mazivo dále mechanicky zpracovávat viz. kapitola 4.4.1, aby se docílilo jemnější mikrostruktury. Vzniklo tak nové mazivo s označením Li-1-CP-worked s šířkou vlákna 60 – 115 nm. Rozdíl ve vizuální struktuře mezi mazivy byl zobrazen na Obr. 4-7.



Obr. 4-7 Struktura plastického maziva na bázi lithiového komplexu

### 4.3.2 Podmínky experimentu

Veškeré experimenty byly provedeny v laboratorních prostorách za běžných podmínek. Tj. pokojová teplota  $23,5 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , běžná vlhkost vzduchu  $23 \% \pm 1 \%$  a běžný atmosférický tlak. Měření probíhala v průběh celého dne. Mazivo se aplikovalo vždy pouze pro jednu sadu měření a poté bylo následně vyměněno za nové.

Při použití modulu Sandwich (kapitola 4.2.2 a 4.4.3) byly testy provedeny na podložkách ve velikostech 0,01 mm – 0,5 mm (přesněji  $0,01 \text{ mm} \pm 0,003 \text{ mm}$ ;  $0,03 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ;  $0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$ ;  $0,1 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ ;  $0,3 \text{ mm} \pm 0,035 \text{ mm}$ ;  $0,5 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ ) [36]. Snímky byly pořizovány kamerou Andor Neo (str.32-1.a) s expozičním časem 0,3 s v 16-bitové citlivosti. Pořídil se full image o velikosti 2 160 x 2 560 pixelů s pixelovým binningem 2x2 za pomoci objektivu LU Plan fluor 10x/0,3 (str. 32-2.b).

Při využití modulu ball-on-disk (kapitola 4.2.2 a 4.4.4) bylo na kuličku aplikováno zatížení  $26 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ . Testy byly provedeny kamerou FL-20BW (str.32-1.b) v expozičním čase 50 ms v 16-bitové citlivosti. Byl pořizen snímek o velikosti 1368 x 912 pixelů pomocí objektivu LU Plan fluor 20x/0,5 (str.32-2.c) s pixelovým binningem 4x4. Měřicí interval trval 100 ms v němž bylo pořizeno 10 snímků k vyhodnocení. Testy proběhly při rychlostech 2 mm/s – 1000 mm/s (přesněji v hodnotách 2, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 500, 700, 1 000).

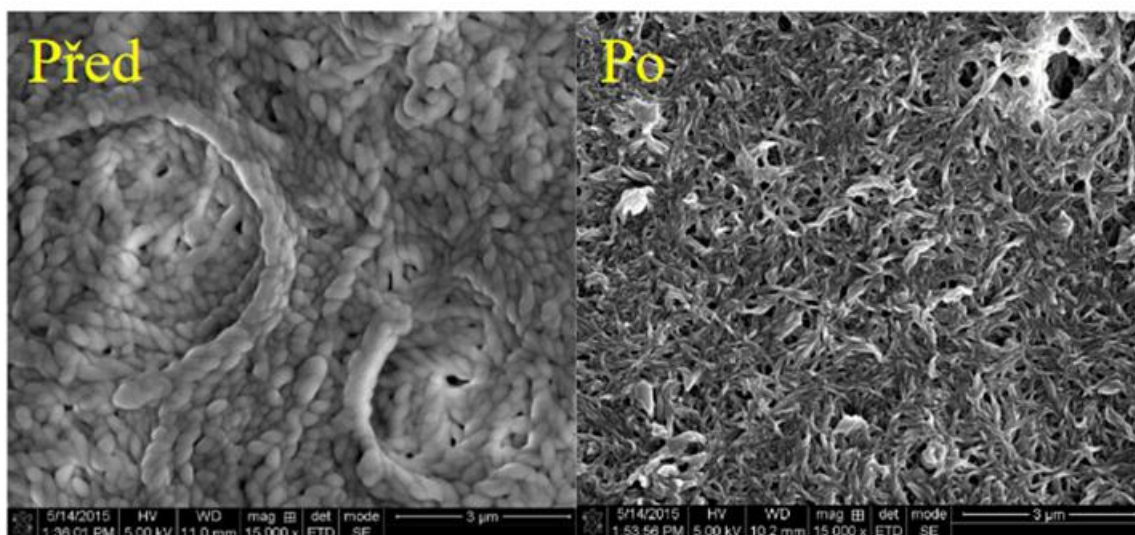
## 4.4 Metody

Tato kapitola řešila celkové postupy zpracování dat a jejich následné vyhodnocování. Byla rozdělena do čtyř sekcí. Prvně komentovala výrobu a kontrolu mechanicky degradovaného plastického maziva Li-1-CP-worked kap.4.4.1, jež bylo vytvořeno ze vzorku Li-1-CP. Následně byla stanovena základní korekce snímků kap.4.4.2, kterou musela projít všechna vyhodnocená měření, aby nedocházelo ke zkreslení dat, vnějším prostorem. Kap.4.4.3 dále řešila problém autofluorescence, vlivu měřicí aparatury a reabsorpce emise jednotlivých vzorků. Byl zde navržen postup, k téměř absolutní eliminaci těchto jevů na konfiguraci sandwich. Následně bylo v kap.4.4.4 navrženo závěrečné měření na kontaktu ball-on-disk pro zjištění procentuálního zastoupení daných složek v kontaktu a jeho blízkém okolí.

#### 4.4.1 Výroba a kontrola plastického maziva Li-1-CP-worked

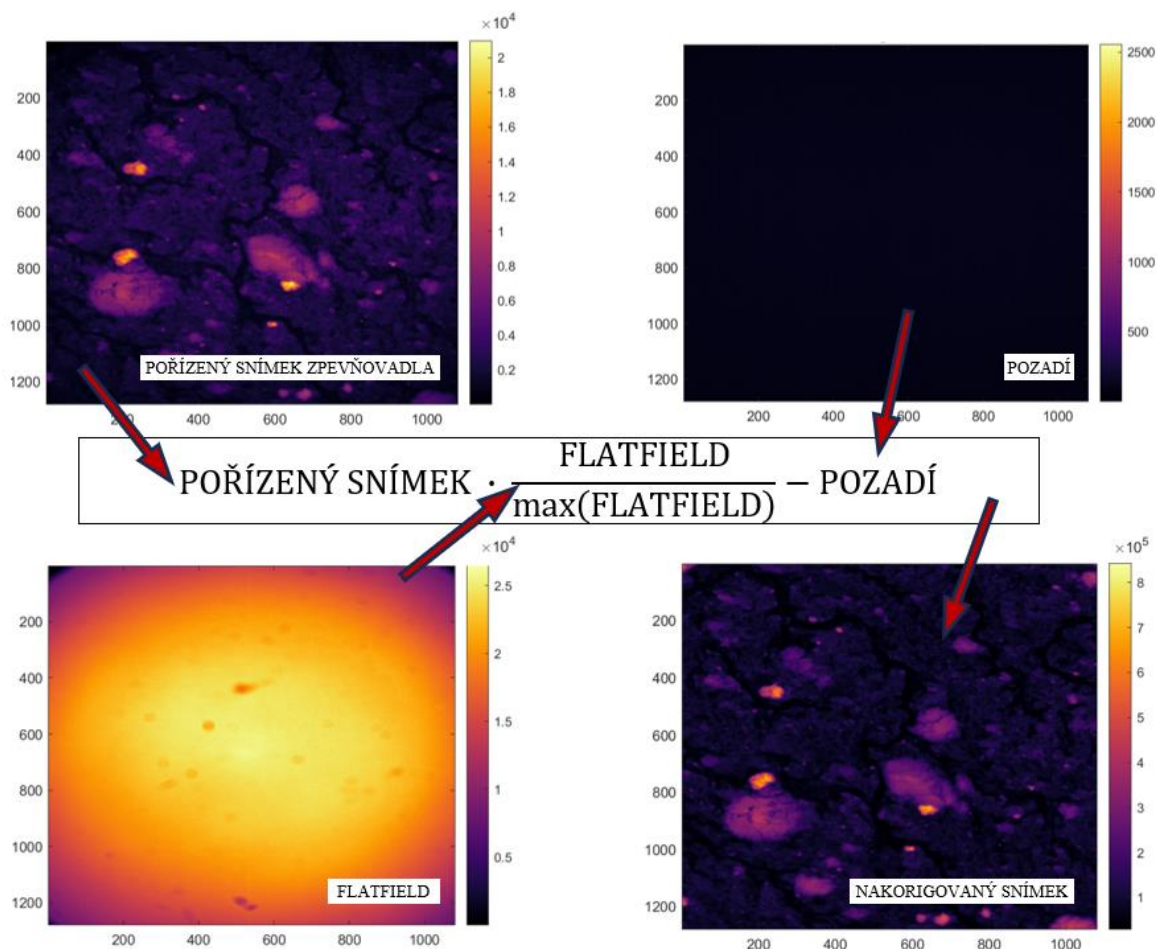
Kvůli potřebě dosáhnout jemnější mikrostruktury plastického maziva, se mazivo Li-1-CP dále zpracovávalo pomocí mechanické degradace. Zjemnění mikrostruktury maziva se provedlo pomocí rotačního grease workeru [37]. Toto zařízení umožňuje pomocí vysokých třecích smykových sil zjemnit hrubá zrna zpevňovačů na o něco jemnější mikrostrukturu. V tomto zařízení se plastické mazivo za pokojové teploty zpracovávalo po dobu celého týdne tedy 168 h. Tato doba degradace byla navržena dle práce **Prokopa** [37] s úpravou doby zpracování, jež byla zkrácena z 240 h na 168 h. Provozní rychlost workeru dosahovala 28 RPM. Obr. 4-8 naznačoval, že již po 15 h zpracování obsahuje struktura jemnější částice zpevňovačů [23].

Vzniklé mazivo bylo dále zkoumáno, zda mechanickou degradací neztratilo své fluorescenční vlastnosti a zdali se nezměnila jejich fluorescenční charakteristika. Pomocí spektrometru se porovnávaly jednotlivé emisní křivky. Analýza byla provedena jak u nově vzniklého maziva Li-1-CP-worked, tak u původního maziva Li-1-CP. Mazivo bylo aplikováno do Sandwich modulu s třemi podložkami 0,5 mm, z důvodu vzniku dostatečně tlusté vrstvy (1,5 mm). Nejprve byla použita aparatura pro pyren. Následně se modul vyčistil, mazivo reaplikovalo a nastavila se aparatura pro coumarin. Stejný postup byl proveden pro obě maziva. Vzorky se pozorovaly separátně, celkem byly provedeny 4 měření, pro každé mazivo 2. Vzniklé křivky byly následně mezi sebou porovnávány.



Obr. 4-8 Snímek složky zpevňovačů před a po 15 h zpracování [23]

## 4.4.2 Flatfield korekce a eliminace signálu v pozadí



Obr. 4-9 Schéma flatfield korekce spolu s odečtením pozadí

Pro jednotlivé experimenty byla provedla flatfield korekce pořízených snímků. Tato metoda se používá především ve fluorescenční mikroskopii k tomu, aby vyrovnala nerovnoměrné osvětlení vzorků. Takto se vyrovnaly části vzorku, kde dopadalo méně světla (okraje) s oblastí s přímým dopadem světla (střed). Flatfield takto upravil každý pixel snímku tak, aby odpovídal reálné scéně. K flatfield korekci se použilo odpovídající mazivo, jež bylo zkoumáno a objektiv jímž mělo být mazivo pozorováno. Mazivo se vložilo pod mikroskop s tím, že se mikroskop do jisté míry rozostřil, aby se eliminoval vliv částic zpevňovačla na flatfield korekci. Po provedení flatfield korekce byl následně navíc odečten signál pozadí vstupující do měřících hodnot. Tento snímek se provedl při vypnutém světelném zdroji. Schéma celkové korekce bylo znázorněno na Obr. 4-9.

#### 4.4.3 Metoda k odstranění parazitní fluorescence

Metoda řešila problém částečné reabsorpce emise a vlivu měřicí aparatury na získanou intenzitu. Funkční spektra použité aparatury totiž dokázala ovlivnit obě fluorescenční barviva a způsobila tak jejich úplnou, či částečnou excitaci. Metoda odstraňovala jednotlivé zmíněné vlivy a snažila se docílit pouze signálu od daného pozorovaného barviva bez jiného zkreslení dat matlab skriptem Příloha 1. Tyto informace vyplynuly z rešerše (kap. 2.2.2 str. 25), kde jednotlivá použitá barviva mají v jedné části společné spektrální křivky. Navíc čisté mazivo Li-1 vykazuje známky autofluorescence díky fluorescenční vlastnosti lithia. K eliminaci těchto parazitních hodnot se všechny vzorky Li-1-CP, Li-1-C, Li-1-P a Li-1 (obdobně s Urea1, Urea2 a PAO8) pozorovaly jak aparaturou pro pyren, tak i aparaturou pro coumarin, aniž by nutně toto barvivo vůbec obsahovaly níže popsaným způsobem.

Pro tuto část se použilo modulu Sandwich Obr. 4-5, objektivu LU Plan fluor 10x/0,3 (str. 32-2.b) a kamery Andor Neo (str.32-1.a). Vzorek maziva byl vložen mezi dvě kruhová sklíčka, přičemž mezi sklíčka byly vloženy podložky v různých velikostech (viz. kap. 4.3.2). Mazivo nebylo vloženo v přesně stanoveném množství, ale provedla se optická kontrola, zda se nachází v celém meziprostoru mezi podložkami a sklíčky. Následně se modul s mazivem umístil pod mikroskop. Barviva obsažená v plastickém mazivu dosahovala za některých zkoumaných tloušťek filmu velmi vysokých intenzit světla. Aby se zamezilo ztrátám informací způsobených přesvícením vzorků a zároveň zachování stejného expozičního času pro všechna měření byly použity pro snížení intenzity ND filtry. Ty byly k dispozici v hodnotách 4, 8, 12 s tím, že se mohly použít současně a násobně tak zmenšit intenzitu zachyceného světla. Použitá hodnota ND filtru se volila dle aktuální intenzity daného vzorku s tím že pro danou distanční podložku a mazivo zůstal zachován stejný filtr jak pro pozorování pyrenu, tak i coumarinu. Použité ND filtry byly zaneseny do následující tabulky tab. 4-4 pro každý vzorek daného maziva.

Mazivo pro experiment bylo použito pouze pro jednu sadu snímků a následně se vyměnilo. Jednou sadou bylo myšleno pořízení snímku pro aparaturu pro pyren a následně pro aparaturu pro coumarin v tomtéž pozorovaném místě (se vzorkem se nehýbalo). Byly provedeny přesně 3 sady měření pro jednu danou podložku. Celkově se tedy provedlo 18 sad měření, jež odpovídá 36 snímkům pro jedno konkrétní mazivo (např. Li-1-CP). Jak již bylo zmíněno testovali se 4 různá zastoupení maziva o daném zahušťovadle, což vede celkem k 72 sadám měření pro jeden druh. Navíc úvodní testování proběhlo na základovém oleji PAO8.

tab. 4-4 Seznam použitých ND filtrů pro jednotlivá maziva pro parazitní fluorescenci

<b>Tloušťka podložky (mm)</b>	<b>0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>0,05</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>	<b>0,5</b>
Li-1-CP	16	4, 8	16	4, 16	8, 16	8, 16
Li-1-C	4	8	8	8	4, 16	4, 16
Li-1-P	8	16	16	4, 8	8, 16	8, 16
Li-1	-	-	4	4	4	8
Urea1-CP	4, 16	4, 16	4, 16	4, 16	8, 16	8, 16
Urea1-C	4, 16	4, 16	4, 16	4, 16	8, 16	8, 16
Urea1-P	4	4	8	8	4, 8	4, 8
Urea1	-	-	-	-	-	-
Urea2-CP	4	8	8	16	4, 8	4, 16
Urea2-C	8	8	8	4, 8	4, 16	8, 16
Urea2-P	4	4	4	8	16	4, 8
Urea2	-	-	-	-	-	-
PAO8-CP	16	4, 16	8, 16	8, 16	4, 8, 16	4, 8, 16
PAO8-C	16	4, 16	8, 16	8, 16	4, 8, 16	4, 8, 16
PAO8-P	4	8	16	16	4, 16	4, 16
PAO8	-	-	-	-	-	-

Postup experimentu byl proveden následovně:

1. Očištění modulu
2. Vložení podložky a plastického maziva do modulu
3. Nastavení aparatury pro pyren, pořízení snímku
4. Nastavení aparatury pro coumarin, pořízení snímku
5. Očištění modulu
6. Vyhodnocení snímků

Hodnoty ze tří sad měření jedné podložky konkrétního maziva byly zprůměrovány a dále zpracovány MATLAB skriptem Příloha 1. Postup řešení skriptu byl zobrazen na dalším schématu Obr. 4-10 a v rovnicích (1), (2) a (3). V prvním kroku (zelená a rovnice (1)) byly sečteny jednotlivé již zprůměrované hodnoty intenzit, při pozorování aparaturou pro coumarin, od maziv Li-1, Li-1-C a Li-1-P. Ve druhém kroku (červená a rovnice (2)) se touto sumou vydělila zprůměrovaná intenzita světla maziva Li-1-CP. V kroku číslo tři (fialová a rovnice (3)) se získaným koeficientem přenásobily původní zprůměrované intenzity od maziv Li-1, Li-1-C a Li-1-P. V konečném kroku čtyři (oranžová) se hodnoty intenzit světla převedly na procenta. Stejný postup i výpočet byl proveden i pro aparaturu k pozorování pyrenu. Tato metoda se dále provedla též na oleji PAO8 a vzorcích Ureal a Urea2.

$$sum_{in} = Li_C + Li_P + Li \quad (1)$$

$$k_{in} = \frac{Li_{CP}}{sum_{in}} \quad (2)$$

$$pafl_C = \frac{Li_C \cdot k_{in}}{Li_{CP}} ; pafl_P = \frac{Li_P \cdot k_{in}}{Li_{CP}} ; pafl_m = \frac{Li \cdot k_{in}}{Li_{CP}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

$sum_{in}$  – suma intenzit od jednotlivých maziv

$k_{in}$  – koeficient intenzity světla

$Li_C$  – korigovaná a zprůměrovaná intenzita maziva obsahující pouze barvivo coumarin

$Li_P$  – korigovaná a zprůměrovaná intenzita maziva obsahující pouze barvivo pyren

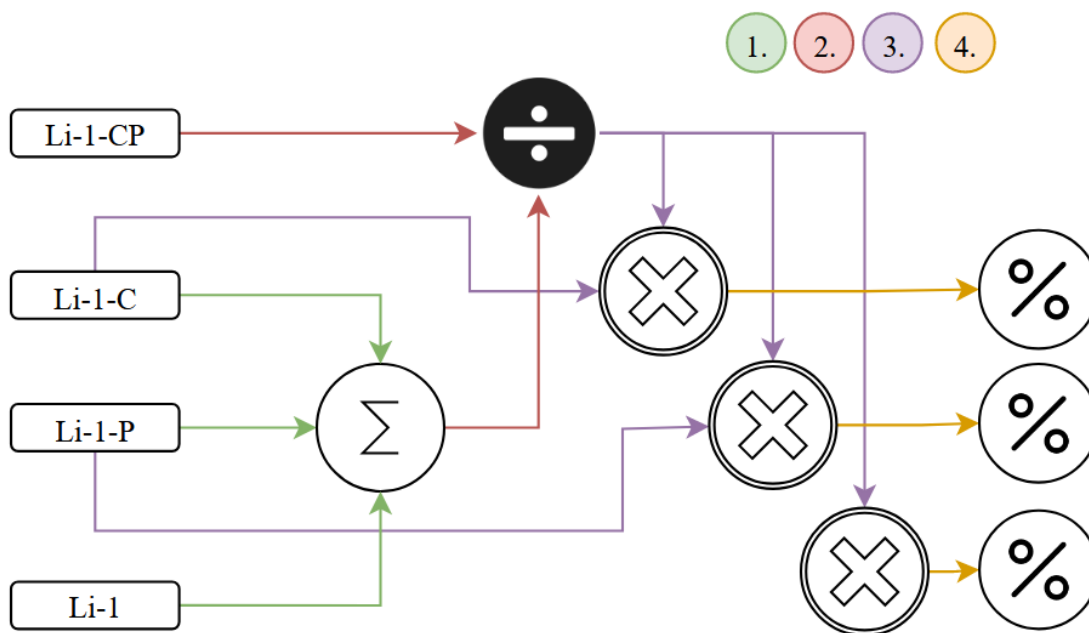
$Li$  – korigovaná a zprůměrovaná intenzita maziva neobsahující barvivo

$Li_{CP}$  – korigovaná a zprůměrovaná intenzita maziva obsahující barvivo coumarin a pyren

$pafl_C$  – koeficient parazitní fluorescence barviva coumarin v mazivu  $Li_{CP}$

$pafl_P$  – koeficient parazitní fluorescence barviva pyren v mazivu  $Li_{CP}$

$pafl_m$  – koeficient parazitní fluorescence od autofluorescence maziva v  $Li_{CP}$



Obr. 4-10 Schéma provedení konfigurace

#### 4.4.4 Zastoupení složek plastického maziva

Experimentální pozorování plastického maziva bylo provedeno v konfiguraci ball-on-disk Obr. 4-6, při zatížení kontaktu (kulička – disk) 26 N. Plastické mazivo bylo nanášeno na skleněný disk (BK7) v dostatečném množství, aby v průběhu experimentu nedocházelo k hladovění kontaktu. Modul byl navíc doplněn o stírač, který zaručoval rovnoměrné formování vstupního maziva do kontaktu. Tento stírač rovněž napomáhal k udržení plně zaplavených podmínek při prováděných testech. K pozorování jednotlivých maziv bylo využito již zmíněné měřicí aparatury (kap. 4.2.1). Kamera FL-20BW (str. 32-1.b) snímala 10 snímků v časovém bloku 100 ms při expozici 50 ms při využití objektivu LU Plan fluor 20x/0,5 (str.32-2.c). Tento objektiv dokázal zachytit pouze velmi malou zornou oblast, díky které nebyla pořízená data natolik ovlivněna okolní fluorescenční intenzitou. Přesto byla pro měření provedena flatfield korekce a odečtena hodnota pozadí (viz. kap. 4.4.2) pro objektiv LU Plan fluor 20x/0,5 a dané testované mazivo.

V této části práce bylo již testováno pouze plastické mazivo obsahující obě fluorescenční barviva. Jednalo se o vzorky Li-1-CP, Li-1-CP-worked, Urea1-CP a Urea2-CP. Tyto maziva byla nanášena na skleněný disk a následně měřena. Pro jeden nanesený vzorek se provedla jedna sada měření. Sadou měření se rozumělo provedení testů od nejvyšší testované rychlosti 1000 mm/s po nejmenší rychlost 2 mm/s bez skluzu.

Toto sestupné uspořádání bylo voleno za účelem zamezení ulpívání částic zpevňovačla na povrchu kuličky, k němuž docházelo za nízké rychlosti a tím by bylo napomáháno k opticky navýšenému podílu složky zpevňovačla. K tomuto zjištění již došlo při úvodních testech, které byly provedeny pro jednu dávku maziva Li-1-CP pro rychlost 5 mm/s, 50 mm/s, 250 mm/s, 500 mm/s a 1 000 mm/s viz. kapitola 5.3.1. nejprve v sestupném pořadí a následně v pořadí vzestupném.

Z důvodu omezené přístrojové vybavenosti laboratoře, se předpokládalo identické chování maziva při všech prováděných testech. Tzn. že při dané rychlosti byla koncentrace složek při plně zaplavených podmínkách stále konstantní a nezáleželo na době testování, popř. časové prodlevě mezi výměnou aparatur. Takto mohla vzniknout daná chronologie experimentu viz. níže.

V každé sadě měření bylo zhotoveno 10 snímků pro aparaturu pro pyren a 10 snímků s aparaturou pro coumarin pro každou rychlost. Testovaných rychlostí bylo dohromady 18, celkový počet snímku dosahoval čísla 360 v jedné měřicí sadě. Celkem byly provedeny 3 sady měření, které se následně mezi sebou zprůměrovaly pro danou pozici.

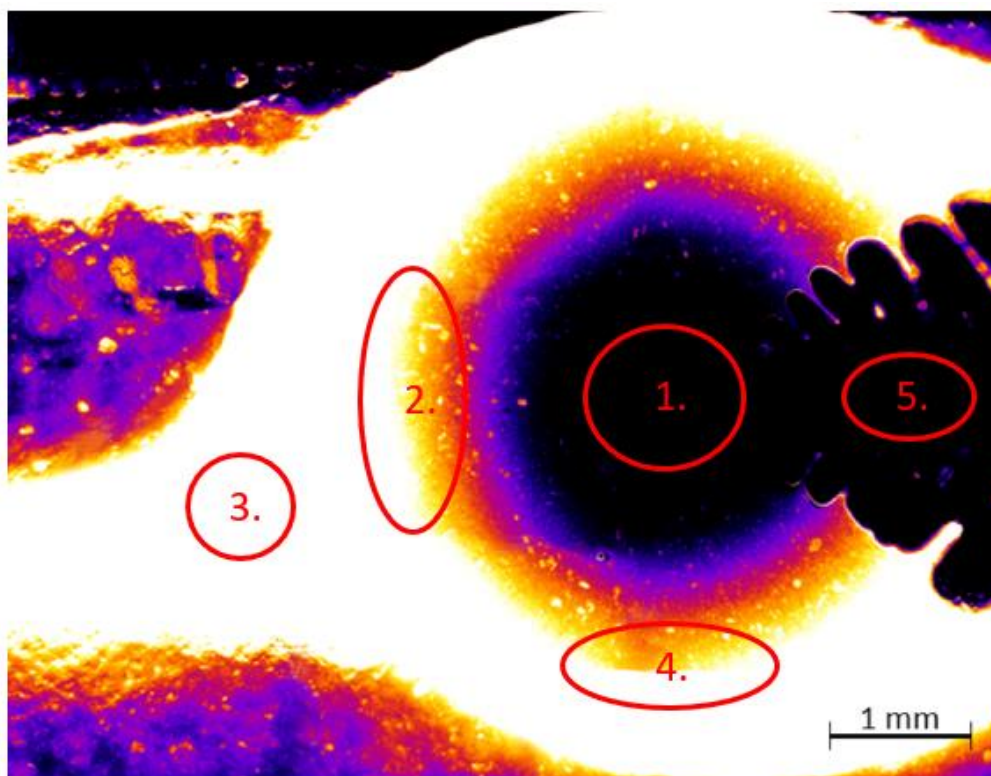
Postup experimentu byl proveden následovně:

1. Očištění modulu
2. Nanesení maziva na disk
3. Vložení stírače, přimontování disku a jeho zatížení
4. Nastavení aparatury pro pyren
5. Roztočení disku s kuličkou požadovanou rychlostí
6. Pořízení 10 snímků v časovém intervalu 100 ms
7. Zastavení disku s kuličkou
8. Nastavení aparatury pro coumarin
9. Roztočení disku s kuličkou stejnou rychlostí z bodu 5
10. Pořízení 10 snímků v časovém intervalu 100 ms
11. Zastavení disku s kuličkou
12. Opakování postupu od bodu 4 do naměření všech testovaných rychlostí

Daných testovaných pozic bylo celkem 5 viz. Obr. 4-11. Práce se snažila popsat koncentraci složek nejen přímo v kontaktu (1.), ale i v jeho blízkém okolí (2.-5.). Byl zkoumán přímý kontakt kuličky a disku (1.). Dále meniskus (2.), jež sloužil jako rezervoár plastického maziva, jež kulička hrnula před sebou. Posléze byla měřena též vtoková jamka (3.), kde by se mělo nacházet čisté mazivo v přirozené formě, tzn. neovlivněné tlakem a dráhou kontaktu. Předposlední pozice se nachází v okolí kontaktu (4.), kde se předpokládá symetrické chování maziva podél osy kuličky, proto byl testován pouze vnitřní bok kuličky (blíže ke středu disku) a jako poslední byla testována dráha vznikající za kuličkou (5.).

Přiřazení jednotlivých čísel k Obr. 4-11:

1. Kontakt kuličky a disku
2. Meniskus
3. Vtoková jamka
4. Okolí kontaktu
5. Dráha za kontaktem



Obr. 4-11 Testované pozice v kontaktu a jeho okolí

I v tomto případě docházelo k získání velmi vysokých hodnot intenzit světla při plném výkonu zdroje. Proto byla dodávaná energie světelnému zdroji v dostatečné míře regulována, tak aby bylo dosaženo intenzit menších, než byla hranice 65 536 (dynamický rozsah kamery). Tímto způsobem bylo předcházeno ztrátám informací přesvícením vzorků. Přičemž regulace výkonu zdroje světla zůstala stejná pro všechna statistická měření v daném sledovaném místě a byla měněna pouze při přechodu testů do jiné sledované pozice.

Vyhodnocení proběhlo pro každou změřenou sadu dané pozice zvlášť. K vyhodnocení bylo použito MATLAB skriptu Příloha 2, jehož postup vyhodnocování byl zobrazen v rovnici (4) popř. v Obr. 4-12. Nejprve se 10 pořizovaných snímků zprůměrovalo v jeden reprezentativní snímek daného barviva (*snímek<sub>i</sub>*), na který byla aplikována flatfield korekce a odečteno pozadí viz. kapitola 4.4.2.

$$\frac{snimek_i \cdot hmko_i \cdot pafl_i}{\sum snimek_i \cdot hmko_i \cdot pafl_i} \quad (4)$$

$snimek_i$  – Korigovaný snímek (kap. 4.4.2)

$hmko_i$  - Hmotnostní koeficient koncentrace dané složky (dán výrobcem)

$pafl_i$  - Koeficient parazitní fluorescence (kap. 5.2)

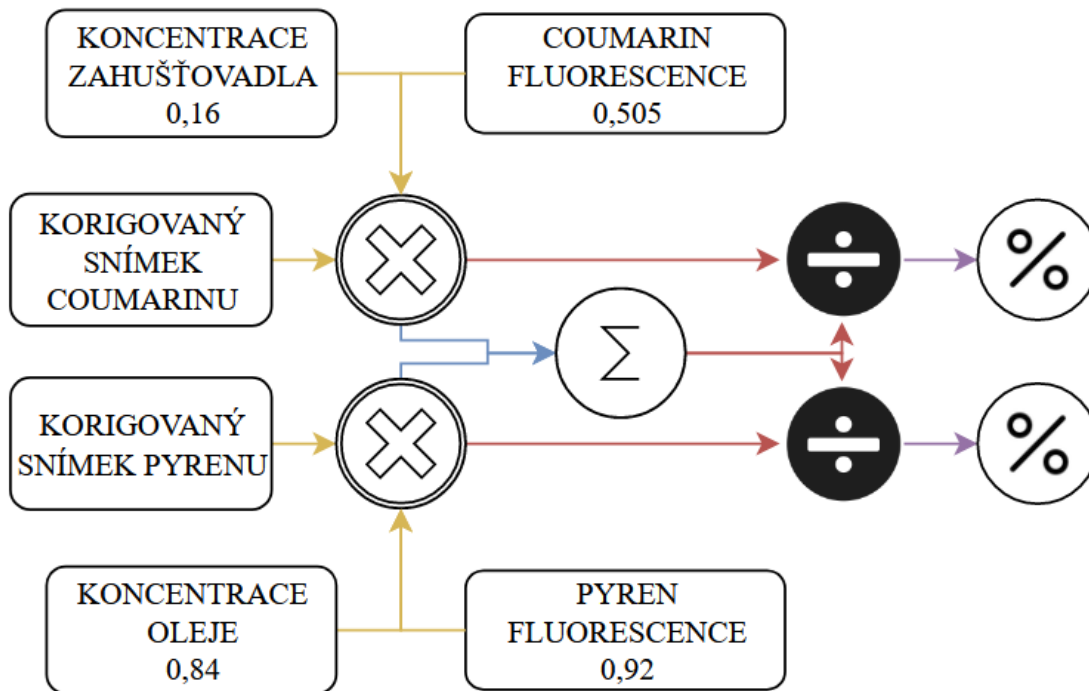
$i$  - Index, C – pro barvivo coumarin, P – pro barvivo pyren

Takto vznikly dva reprezentativní snímky, jeden pro coumarin (index C) a druhý pro pyren (index P) pro každou konkrétní rychlost. Tyto korigované snímky se následně násobily hodnotou hmotnostní koncentrace dané složky ( $hmko_i$ , Obr. 4-12 žlutá). Další koeficient, který vstupoval do výpočtu byla hodnota viděného světla danou aparaturou ( $pafl_i$ , Obr. 4-12 žlutá). Hodnota koncentrace vycházela z tab. 4-2 (eliminovat se takto obsah jednotlivých složek, přičemž byl použit koeficient odpovídající pozorovanému barvivo při jeho aparatuře) a hodnota parazitní fluorescence z výsledků v kapitole 5.2 (eliminovat se takto jev reabsorpce emise a vliv použité aparatury).

Takto upravené snímky byly následně sečteny (Obr. 4-12 modrá) a tímto součtem poděleny (Obr. 4-12 červená). Vznikem těchto operací bylo procentuální zastoupení jednotlivých složek v celém snímku (Obr. 4-12 fialová), kdy bylo následně zúženo pole zájmu pouze na studovanou pozici Obr. 4-13 (bílý čtverec). Toto pole zájmu zůstalo zachováno pro všechny zkoumané rychlosti daného maziva pro danou pozici.

Na Obr. 4-12 byl znázorněn aktuální příklad pro mazivo na bázi lithiového komplexu Li-1-CP. Koncentrace složek vycházela z tab. 4-2 kde u Li-1 byla koncentrace zahušťovadla 16 % a u základového oleje 84 %. Z výsledků kapitoly 5.2.1 vyplývá že při aparatuře pro coumarin získaná data odpovídají z 50,5 % opravdu barvivo coumarin. Z pyrenové aparatury naopak 92 % informací bylo zachyceno od barviva pyren.

Práce byla navíc v pozici 1. (kontakt kuličky a disku) doplněna o informaci o vnikající tloušťce filmu, která byla změřena v separátním experimentu při stejných testovacích podmínkách pomocí metody interferometrie. Každé mazivo bylo opět při zatížení 26 N testováno od rychlosti 1000 mm/s do rychlosti 2 mm/s v sestupném pořadí ve třech sadách experimentů během kterých bylo mazivo vždy vyměněno. Při testech bylo opět použito stírače, jež zajišťoval stálý přísun maziva přesně do kontaktu, aby nevznikalo jeho hladování.

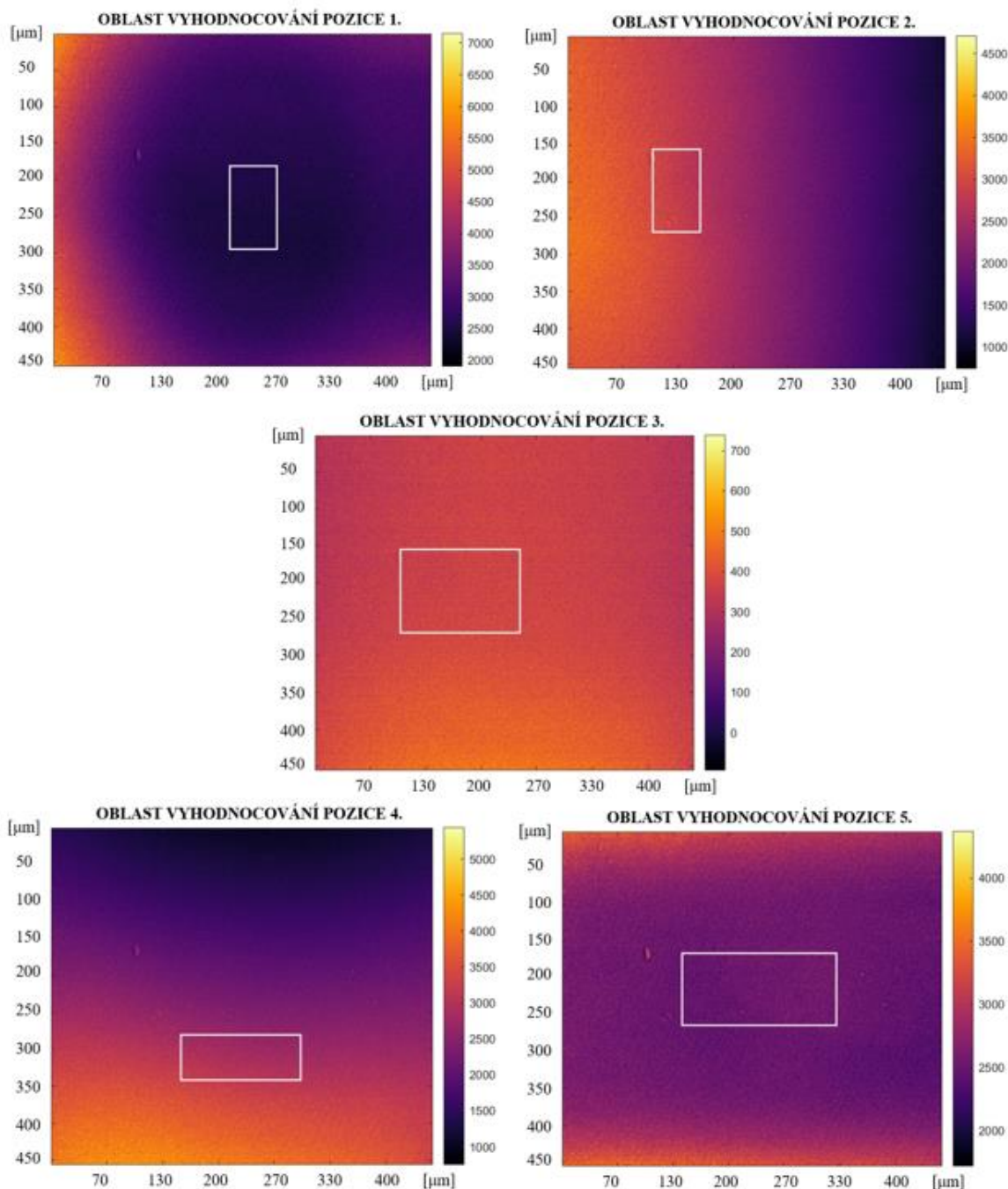


Obr. 4-12 Schéma postupu výpočtu maziva Li-1-CP

Vzniklá metoda zpracování a kalibrace snímků byla otestována na statickém kontaktu při atmosférickém tlaku. V tomto stavu se předpokládalo zastoupení jednotlivých složek velmi podobné tomu, ve kterém se plastické mazivo vyrábělo. K tomuto testu bylo použito modulu Sandwich, opět ve třech sadách měření.

K vyhodnocení testů muselo být zúženo vyhodnocovací pole snímku viz. bílé obdélníky na Obr. 4-13 pro každou testovanou pozici zvlášť. V případě vyhodnocování celého snímku by již docházelo ke zkreslování dat z okolí. K nejvíce chybám by došlo u pozice 1., kde na Obr. 4-13 byl zachycen nejen samotný kontakt kuličky a disku, ale jeho bezprostředně blízké okolí. Proto bylo použito zúžení oblasti zájmu, aby bylo dosaženo výsledků pouze a jen ve zkoumané oblasti.

V Obr. 4-11 byl kontakt zachycen objektivem 5x/0,15 z důvodu širšího zorného pole navíc byl obrázek složen z vícera snímků, tak aby byla možnost zachytit celý rozsáhlý prostor kontaktu a jeho blízkého okolí. Pro Obr. 4-13 byl naopak použit objektiv 20x/0,5. Přesto, že byly pozorovány oblasti vyznačené v Obr. 4-11, tak tento objektiv zachytil mnohem menší prostor s mnohem větším detailem viz. měřítko na zmíněných obrázcích. To vede ke značným odlišnostem mezi snímky přes pozorování stejného prostoru.



Obr. 4-13 Zúžené pole zájmu pro jednotlivé pozice

## 4.5 Testované predikce

V případě H.1. H.1:se v experimentu sledovala intenzita jednotlivých barviv pro čtyři různá plastická maziva a to Li-1-CP a Urea1 (obsahující větší částice zpevňovadla) a Li-1-CP-worked a Urea2 (obsahující menší částice zpevňovadla) za stejných provozních podmínek (rychlost, tlak a teplota). Bylo predikováno, že plastické mazivo obsahující větší částice bude dosahovat vyšších intenzit světla pro coumarin, než pro pyren a tím i větší podíl zpevňovadla v kontaktu. U maziva s menšími částicemi by tomu mělo být naopak.

- Závislá proměnná – intenzita světla, obsah zpevňovadla a tloušťka mazací vrstvy, velikost částice zpevňovadla
- Nezávislá proměnná – plastické mazivo
- Kontrolovatelná proměnná – zatížení kontaktu, teplota, vlhkost, rychlost, nastavení kamery, ustavení světla a filtrů

Pro H.2. se v experimentu sledovala opět fluorescenční intenzita jednotlivých barviv. Experiment se však zaměřoval separátně pouze na jeden druh maziva. Test byl proveden za stejných provozních podmínek (zatížení, teplota). Předpokládalo se, že změna rychlosti bude mít dopad na převrat dominance intenzit jednotlivých barviv v kontaktu a jeho okolí.

- Závislá proměnná – intenzita světla, tloušťka mazací vrstvy, obsah zpevňovadla a rychlost
- Nezávislá proměnná – plastické mazivo
- Kontrolovatelná proměnná – zatížení kontaktu, teplota, vlhkost, nastavení kamery, ustavení světla a filtrů

## 5 VÝSLEDKY

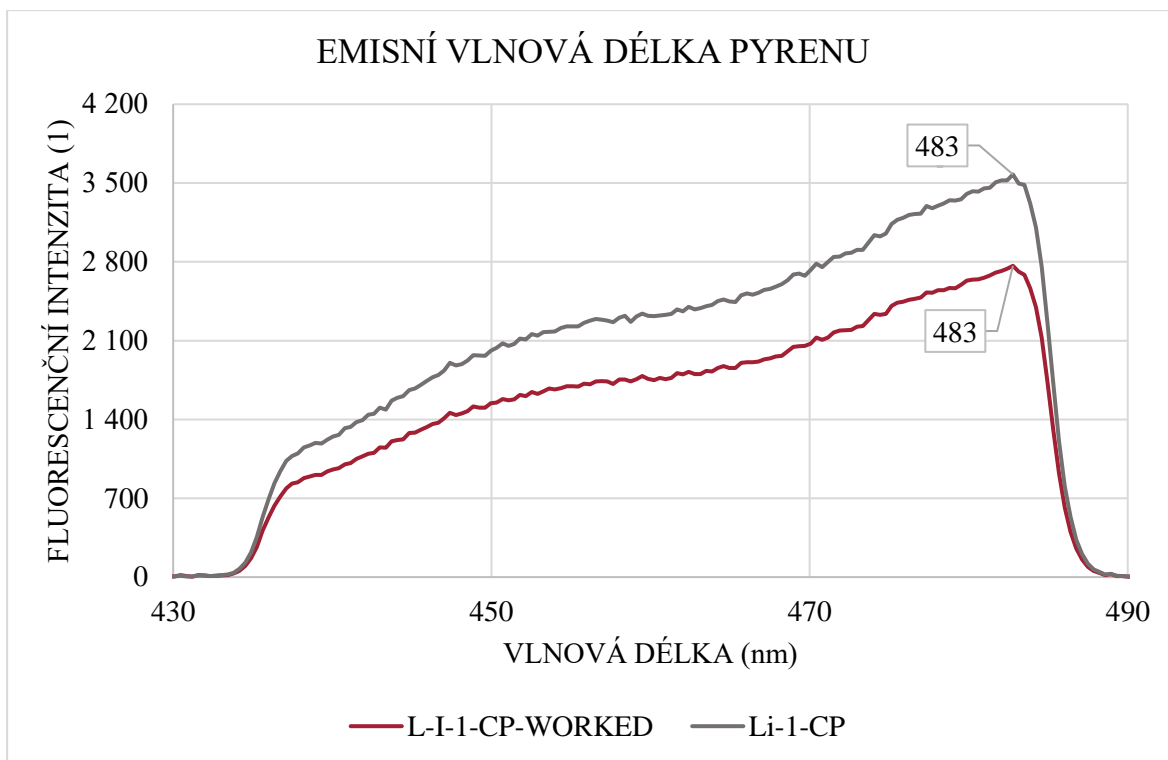
Tato kapitola ukazuje všechny dosažené výsledky práce. Byla rozdělena do čtyř po sobě jdoucích sekcí, kdy první kap.5.1 nastínila vlastnosti nově vzniklého plastického maziva Li-1-CP-worked, jež vzniklo pomocí mechanické degradace. Přičemž kapitola primárně řešila především změnu jeho fluorescenčních vlastností. Dále ve výsledcích kap.5.2 byly zobrazeny data parazitní fluorescence znázorněné u maziva Li-1. Ostatní výsledky parazitní fluorescence plastických maziv Urea1 a Urea2 byly zaneseny do Příloha 3. Výsledky zastoupení jednotlivých složek shrnula kap.5.3. Ta prvně řešila vliv ulpívání částic na kuličky při experimentech a v druhé části shrnula zastoupení jednotlivých složek plastického maziva Li-1-CP ve všech zkoumaných pozicích 1. – 5.. Podrobné výsledky ostatních druhů maziv byly opět zaneseny do Příloha 3. Poslední částí výsledků byla kap.0 shrnující veškeré získané zastoupení jednotlivých složek pro všechna zkoumaná maziva ve všech pozicích. Nacházelo se zde jak jejich grafické znázornění (při rychlosti 25 a 500 mm/s) tak i grafy shrnující zastoupení složky zpevňovačla v závislosti na změně rychlosti.

### 5.1 Kontrola nově vzniklého maziva Li-1-CP-worked

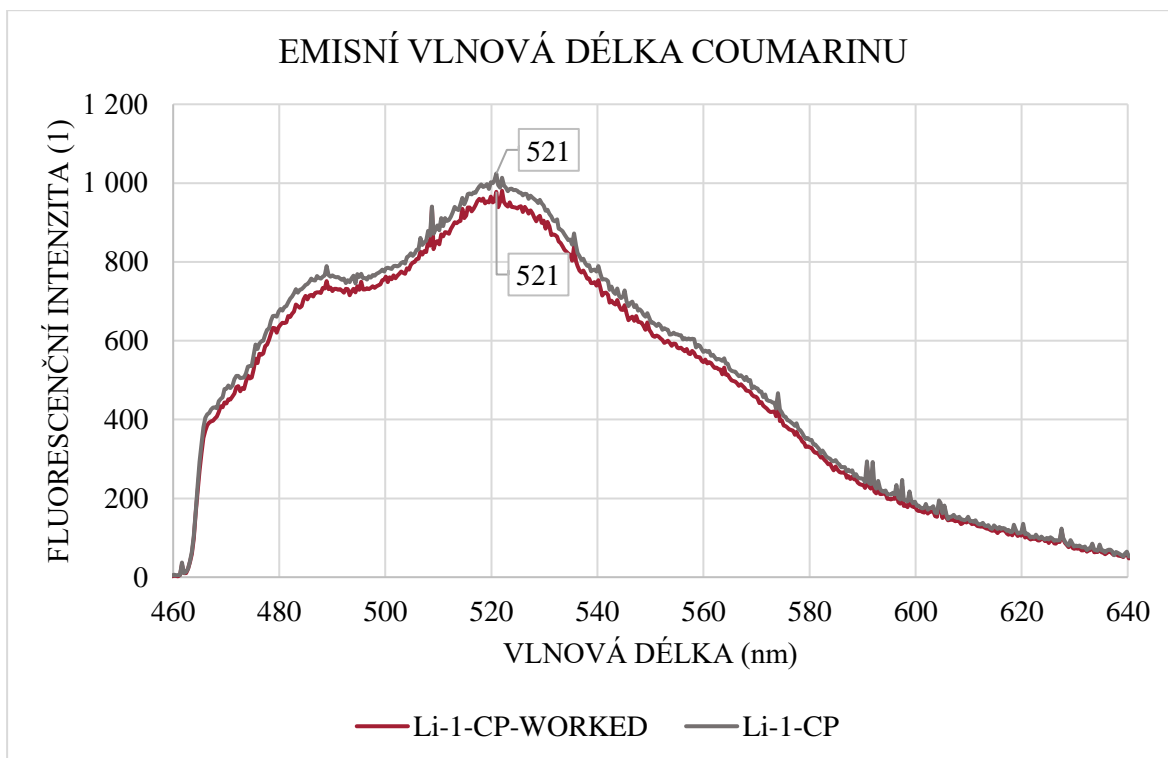
Mazivo Li-1-CP-worked vytvořené mechanickou degradací Li-1-CP vykazovalo změnu mikrostruktury viz. Obr. 4-8. Mazivo navíc lehce změnilo svoji barvu na špinavě žlutou. Degradace dále způsobila nejen zmenšení zrn zpevňovačla, ale i snížení jeho viskozity. To ovlivnilo i jeho schopnost tvořit mazací vrstvu. Při mechanické degradaci se plastické mazivo smykově namáhalo, což mohlo porušit též vlastnosti jeho fluorescenčních barviv. Kontrolní měření fluorescenční schopnosti barviv se nacházejí na přiložených grafech níže Obr. 5-1 a Obr. 5-2.

Emisní křivky původního maziva Li-1-CP (šedá) a zpracovaného Li-1-CP-worked (červená) v případě pozorování aparatury pro pyren dosahovaly podobných průběhů. Na křivkách se mohly sledovat souhlasné gradienty stoupání a klesání, přesto že byly hodnoty fluorescenčních intenzit 1,5 násobně odlišné. Maximální intenzity záření však obě maziva dosáhly při vlnové délce 483 nm.

Z pozorování aparaturou pro coumarin vycházely dvě skoro totožné křivky pro oba druhy maziva. Intenzita opět vykazovala stejné trendy klesání a stoupání v obou případech a data se mezi sebou lišila o 5 %. Maximální intenzity záření coumarin dosáhnul při vlnové délce 521 nm.



Obr. 5-1 Emisní vlnová délka pyrenu



Obr. 5-2 Emisní vlnová délka coumarinu

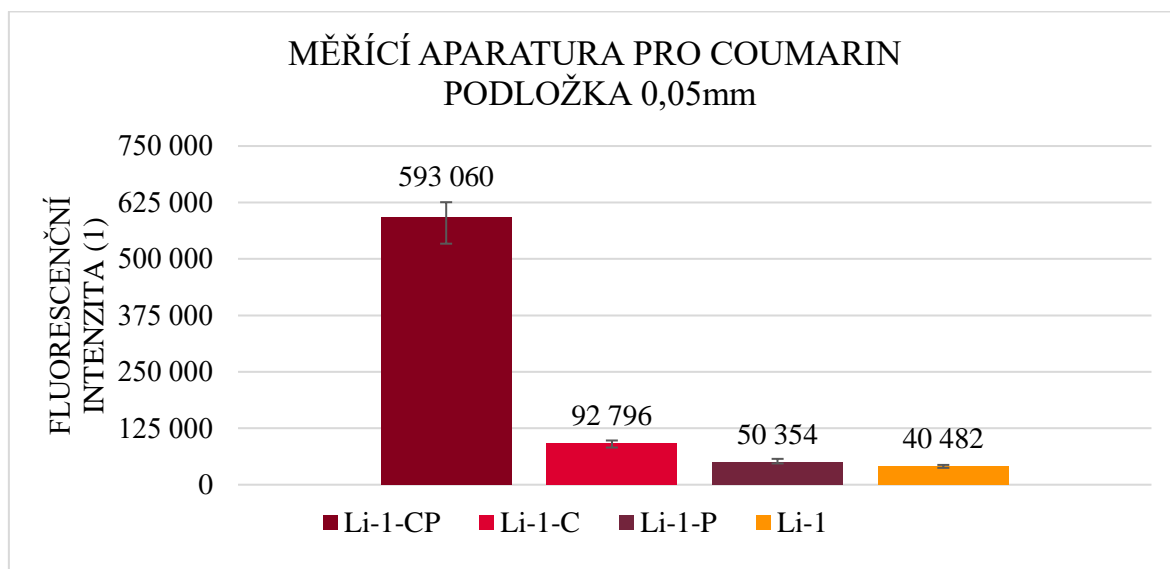
## 5.2 Parazitní fluorescence

### 5.2.1 Mazivo Li-1

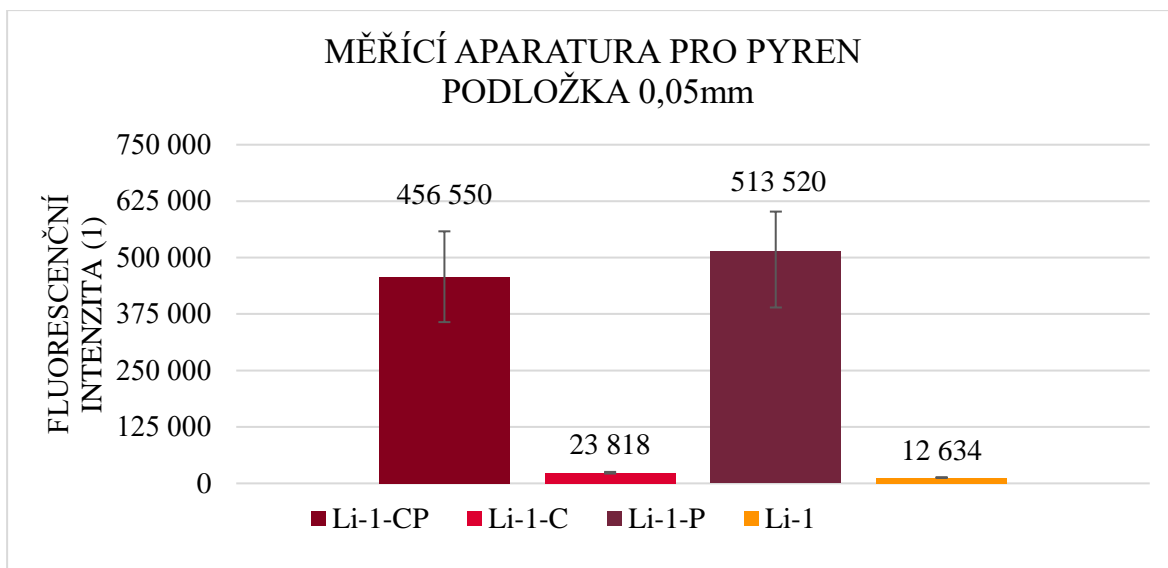
Pořízené intenzity fluorescenčních barev

Plastické mazivo na bázi lithiového komplexu bylo testováno pro všechny tloušťky podložek zmíněných v kapitole 4.3.2. Experimenty byly provedeny na všech jeho 4 vzorcích uvedených v kapitole 4.3.1 postupem z kapitoly 4.4.3. Použití měřicí aparatury pro coumarin při podložce 0,05 mm bylo znázorněno na Obr. 5-3. Nejvyšší fluorescenční intenzity 593 060 zde dosahovalo mazivo Li-1-CP, jež obsahovalo obě fluorescenční barviva coumarin a pyren. Mazivo o pouhém obsahu barviva coumarin, tedy Li-1-C dosahovalo intenzity 92 796. Nejnižší intenzity však nabývalo mazivo neobsahující žádné fluorescenční barvivo a to hodnoty 40 482.

Pokud byla měřicí aparatura vyměněna za aparaturu pro pyren dosáhlo se odlišných fluorescenčních intenzit viz. Obr. 5-4. Intenzita maziva Li-1-CP poklesla na hodnotu 456 550. Naopak intenzita světla zásadně vzrostla u maziva, které obsahovalo pouze barvivo pyren Li-1-P na 513 520. Vzorek maziva bez barviv spolu se vzorkem obsahující pouze coumarin Li-1-C vykazovali velmi nízké hodnoty intenzit světla v řádu 10 000.

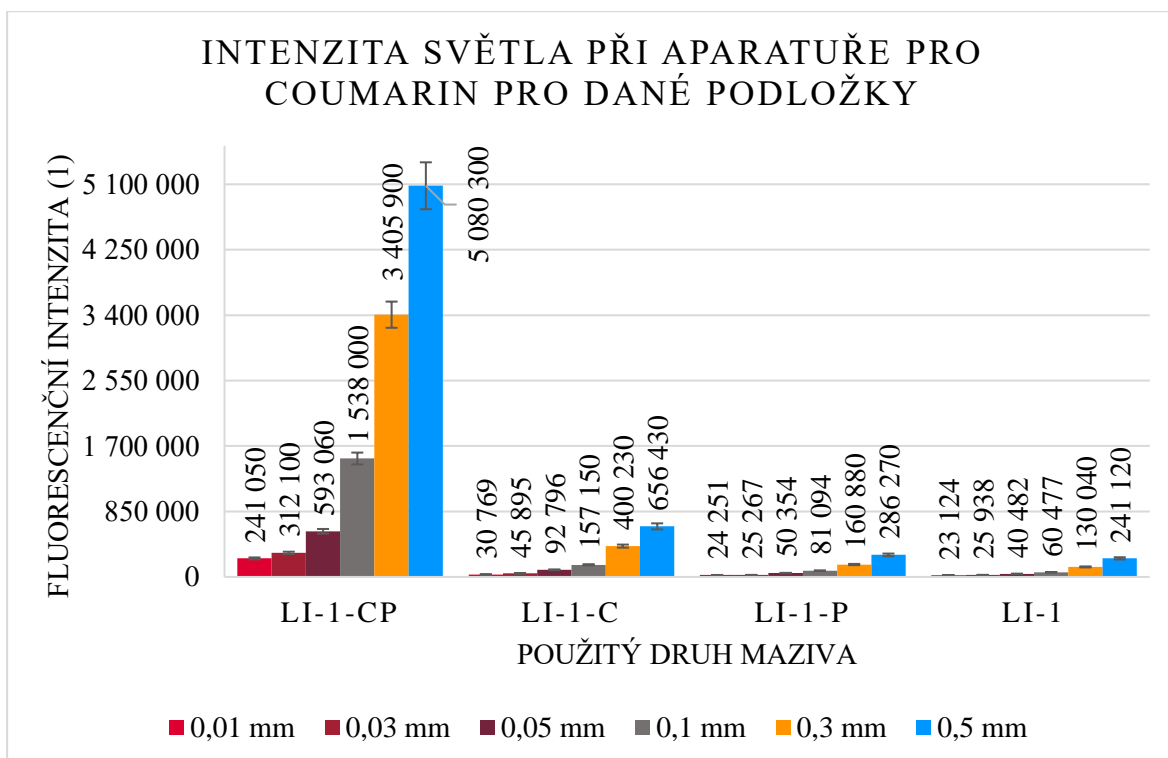


Obr. 5-3 Fluorescenční intenzita lithiového maziva při aparatuře pro coumarin, tloušťka filmu 0,05 mm

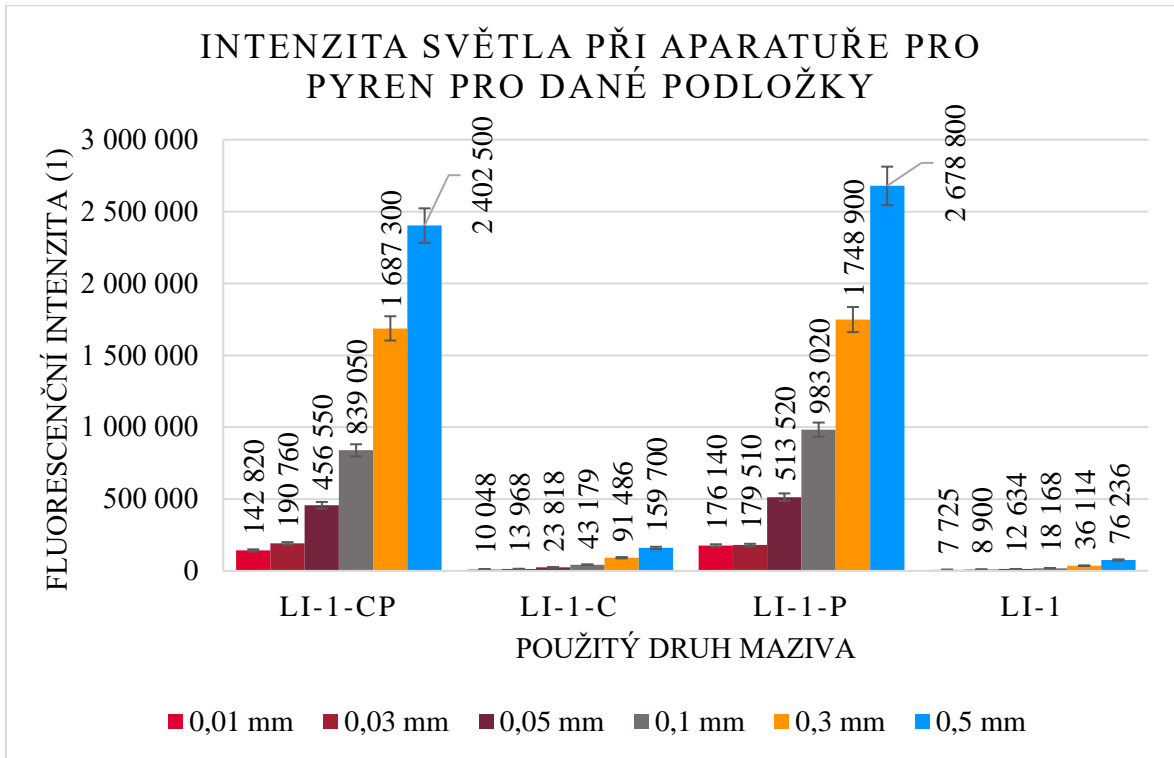


Obr. 5-4 Fluorescenční intenzita lithiového maziva při aparatuře pro pyren, tloušťka filmu 0,05 mm

Tato měření byla provedena pro všechny tloušťky distančních podložek. Získané intenzity světla, jež se zprůměrovaly ze tří sad měření, byly zobrazeny na Obr. 5-5 s aparaturou pro coumarin a na Obr. 5-6 při aparatuře pro pyren, popř. v tabulkách v Příloha 3 (Příloha – kapitola 5.1.1).

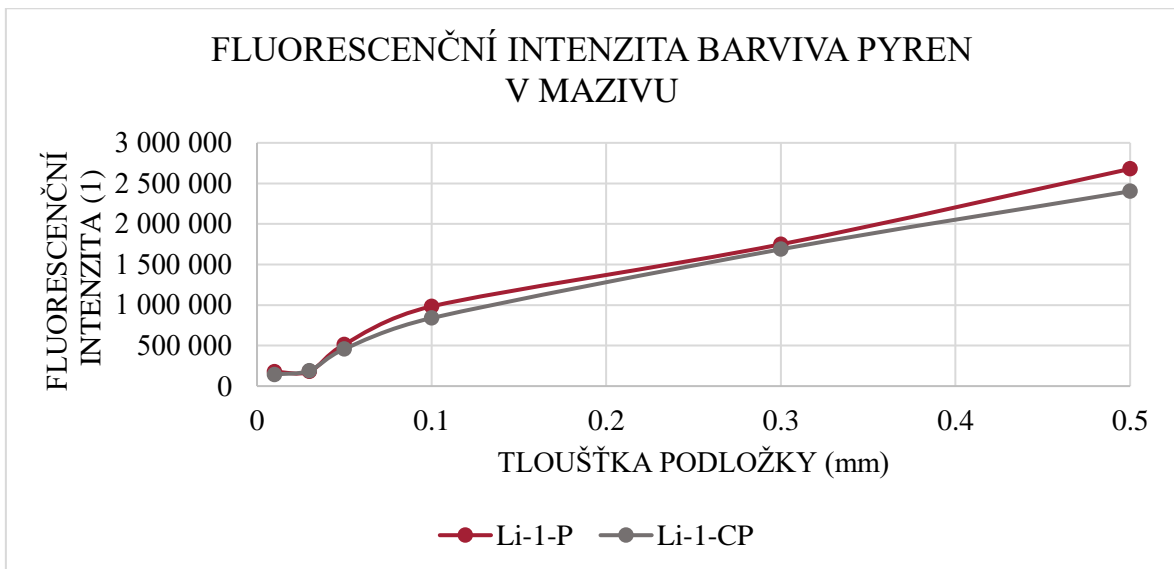


Obr. 5-5 Fluorescenční intenzita lithiového maziva s podložkami při aparatuře pro coumarin



Obr. 5-6 Fluorescenční intenzita lithiového maziva s podložkami při aparatuře pro pyren

Z výše uvedených grafů bylo možné pozorovat, že ve všech případech zvyšování tloušťky mazacího filmu se zvyšovala i získaná intenzita fluorescenčního barviva. Průběh rostoucí intenzity barviva pyren v lithiovém mazivu Li-1-CP a Li-1-P byl zobrazen v Obr. 5-7.



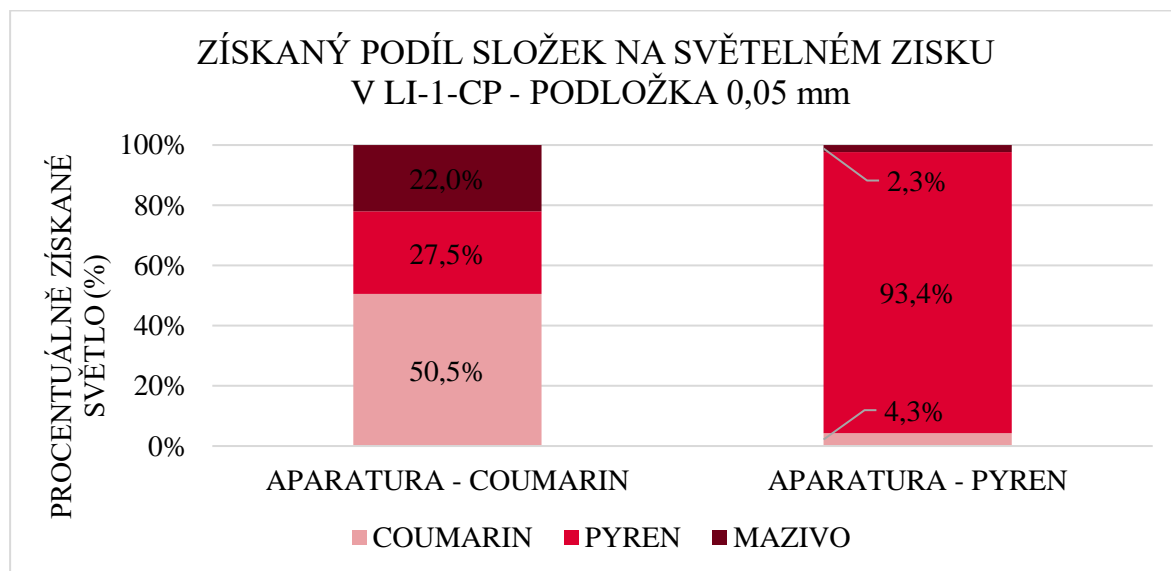
Obr. 5-7 Fluorescenční intenzita barviva pyren v lithném mazivu

## Procentuální zastoupení jednotlivých barev v aparatuře

Z použitého postupu a výpočtu z kapitoly 4.4.3 bylo dosaženo procentuálního množství získaného světla od daného činitele. Při pozorování maziva Li-1-CP aparaturou pro coumarin při tloušťce podložky 0,05 mm Obr. 5-8 bylo zjištěno, že 50,5 % získané fluorescenční intenzity odpovídá barvivo coumarin, 27,5 % barvivo pyren a 22 % intenzity bylo získáno autofluorescenční schopností samotného čistého maziva. Při použití aparatury pro pyren tvořil 93,4 % informací signál od barviva pyren a zbylých 6,6 % tvořil signál od barviva coumarin a samotného maziva.

Výsledky pro všechny testované distanční podložky byly zaneseny s aparaturou pro coumarin do tab. 5-1 a s aparaturou pro pyren do tab. 5-2. Pokud bylo provedeno průměrování jednotlivých činitelů při změně tloušťky filmu, dosahovaly odchylky u pyrenové aparatury maximálních hodnot 2 % kdy barvivo pyren je primárním zdrojem získané intenzity (92 %). Pokud se použila aparatura pro coumarin byla zprůměrovaná data zatížena chybou do 6 %. Získaný signál z poloviny (50,5 %) emitovalo barvivo coumarin a zbylý signál byl získán od barviva pyren spolu s mazivem.

Pokud se zaměřilo pouze na dané barvivo sledované pouze jeho aparaturou Obr. 5-9 bylo viditelné značné kolísání hodnot u barviva coumarinu kolem hodnoty 50,5 % především za nízkých tlouštěk filmu. Hodnota barviva pyren lehce kolísá kolem hodnoty 92 %.



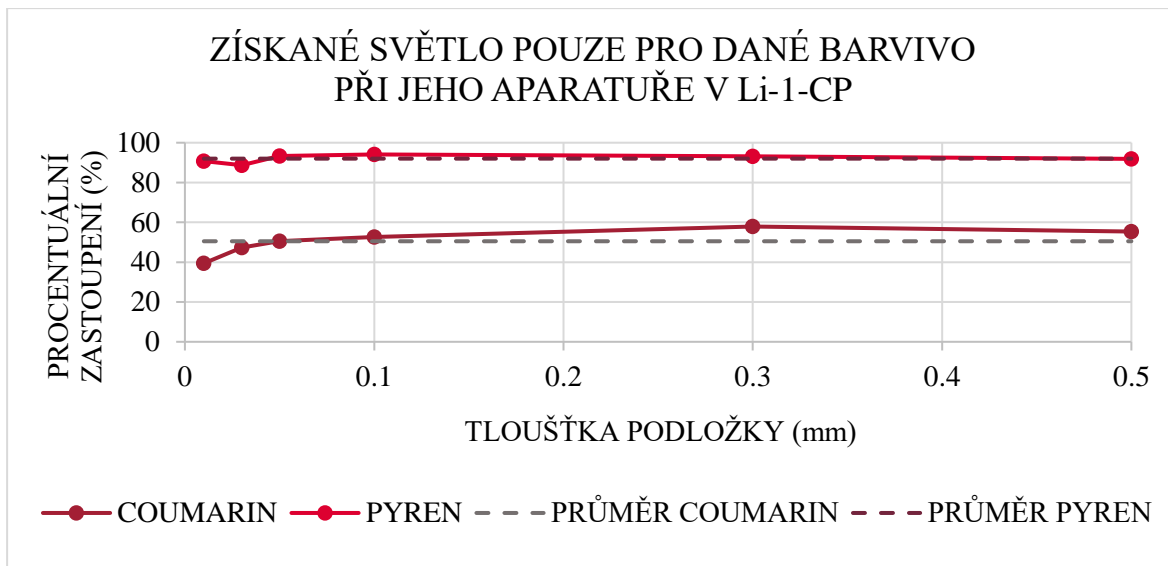
Obr. 5-8 Získaný podíl složek na světelném zisku v mazivu Li-1-CP při tloušťce mazacího filmu 0,05 mm

tab. 5-1 Procentuální zastoupení světla v mazivu Li-1-CP při aparatuře pro coumarin

<b>Podložka (mm)</b>	<b>Coumarin (%)</b>	<b>Pyren (%)</b>	<b>Li-1 (%)</b>
0,01	39,4	31	29,6
0,03	47,3	26	26,7
0,05	50,5	27,5	22
0,1	52,6	27,2	20,2
0,3	57,9	23,3	18,8
0,5	55,4	24,2	20,4
<b>PRŮMĚR</b>	<b>50,52</b>	<b>26,53</b>	<b>22,95</b>
<b>ODCHYLKA</b>	<b>6,01</b>	<b>2,5</b>	<b>3,88</b>

tab. 5-2 Procentuální zastoupení světla v mazivu Li-1-CP při aparatuře pro pyren

<b>Podložka (mm)</b>	<b>Coumarin (%)</b>	<b>Pyren (%)</b>	<b>Li-1 (%)</b>
0,01	5,2	90,8	4
0,03	6,9	88,7	4,4
0,05	4,3	93,4	2,3
0,1	4,1	94,2	1,7
0,3	4,9	93,2	1,9
0,5	5,5	91,9	2,6
<b>PRŮMĚR</b>	<b>5,15</b>	<b>92,03</b>	<b>2,82</b>
<b>ODCHYLKA</b>	<b>0,92</b>	<b>1,85</b>	<b>1,03</b>

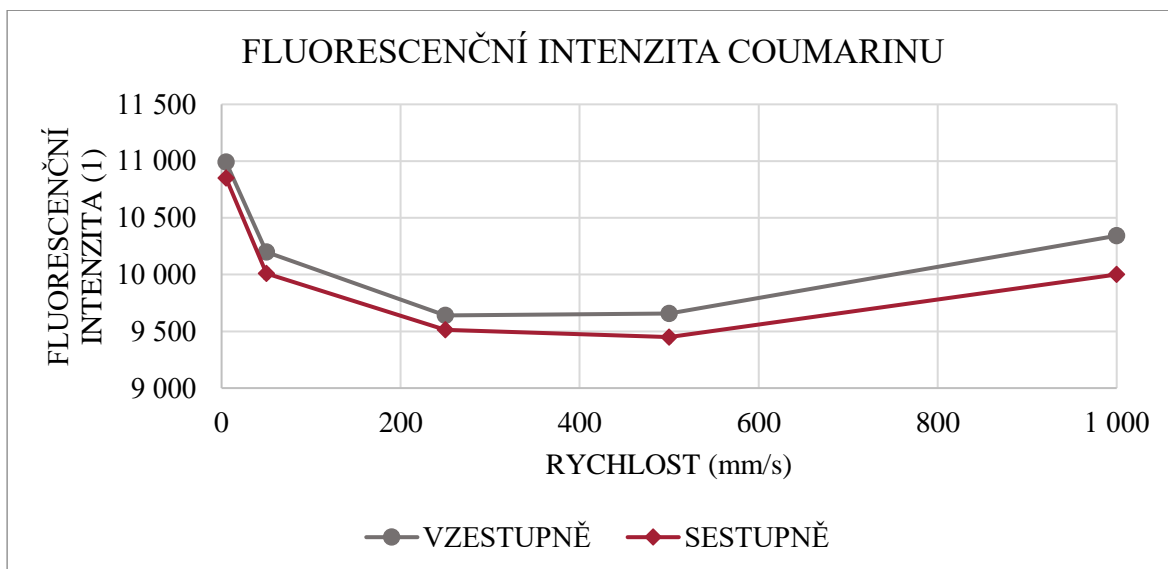


Obr. 5-9 Získané světlo pouze pro dané barvivo pozorované jeho aparaturou u maziva Li-1-CP

### 5.3 Zastoupení složek plastického maziva

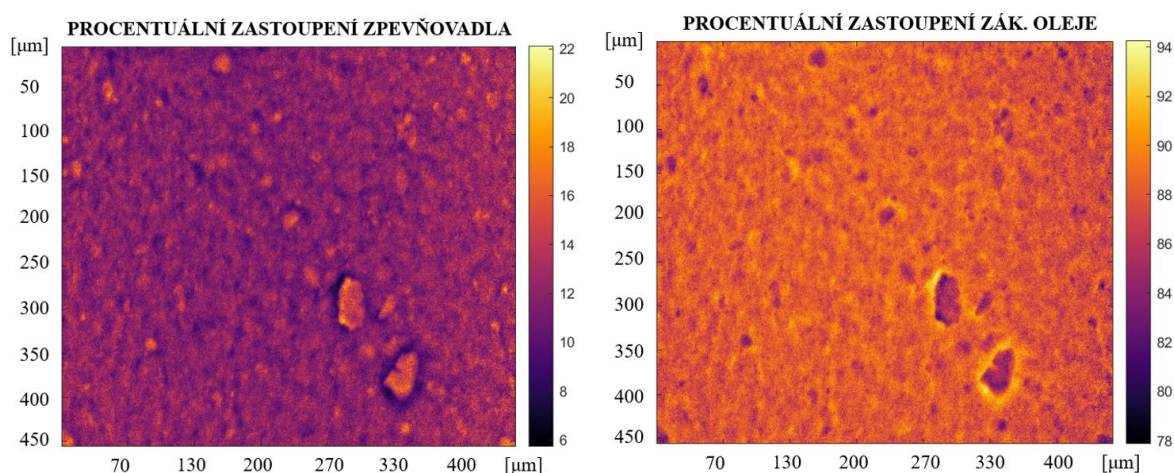
#### 5.3.1 Vliv ulpívání částic na kuličce a disku

Testování vlivu zvyšování/snižování rychlosti bylo provedeno na mazivu Li-1-CP jak bylo popsáno v kapitole 4.4.4. Pokud byly testy provedeny od rychlosti nejmenší tedy od 2 mm/s po rychlost 1 000 mm/s dosahovalo mazivo vyšší fluorescenční intenzity (Obr. 5-10 šedá), než když byly provedeny testy od nejvyšší rychlosti 1 000 mm/s po rychlost 2 mm/s (Obr. 5-10 červená).



Obr. 5-10 Vliv rychlosti na intenzitu světla

### 5.3.2 Mazivo Li-1-CP

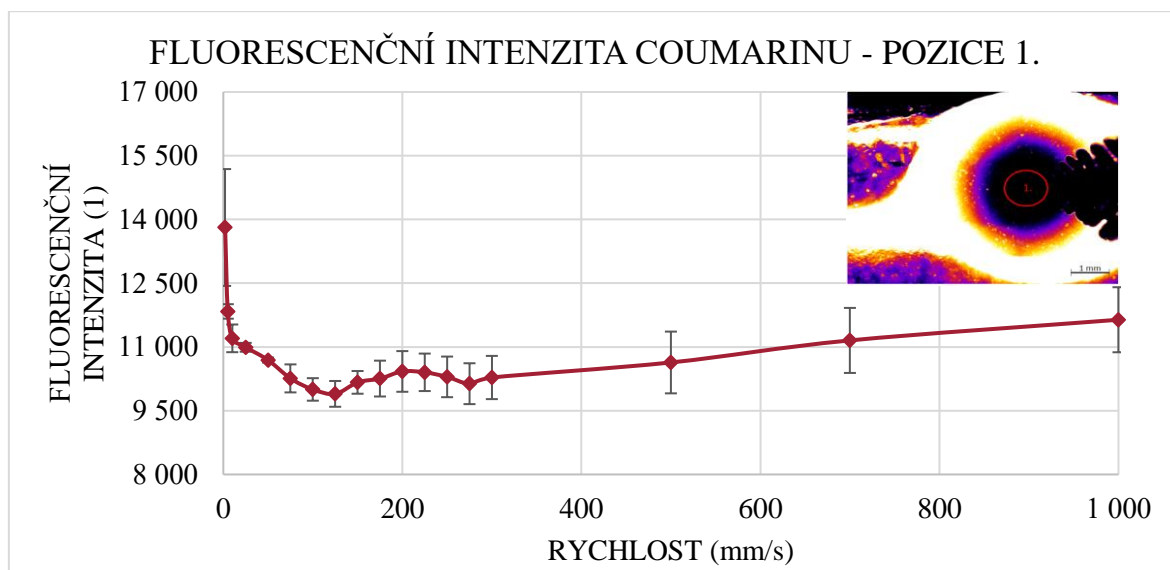


Obr. 5-11 Procentuální zastoupení složek ve statickém kontaktu Li-1-CP

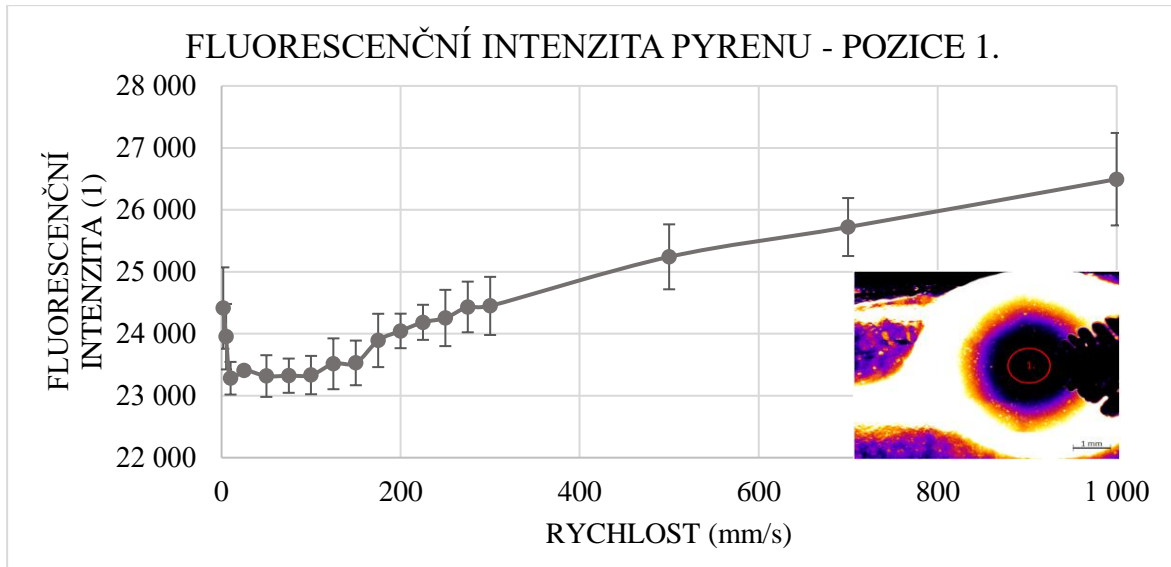
V případě vyhodnocování celého statického kontaktu Obr. 5-11 v modulu Sandwich bylo po zpracování snímků dosaženo 15,4 % obsahu složky zpevňovadla. Základový olej pro mazivo na bázi lithiového komplexu Li-1-CP byl obsažen v kontaktu v zastoupení 84,6 %. Zastoupení složek bylo zatíženo odchylkou 2 %.

#### Pozice 1. – Kontakt kuličky a disku

Při testování plastického maziva Li-1-CP v pozici 1., jež pozorovala kontakt kuličky a disku, bylo dosaženo nejvyšší intenzity barviva coumarinu za nízké rychlosti Obr. 5-12. Pokud byla rychlost zvyšována docházelo ke snížení celkové intenzity barviva do rychlosti 125 mm/s. V této rychlosti nastávalo tzv. bod zlomu „V” od kterého posléze intenzita světla začala opět mírně růst.



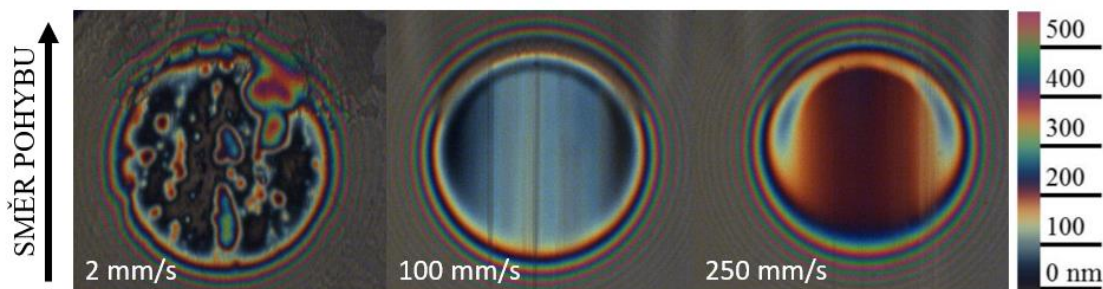
Obr. 5-12 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 1.



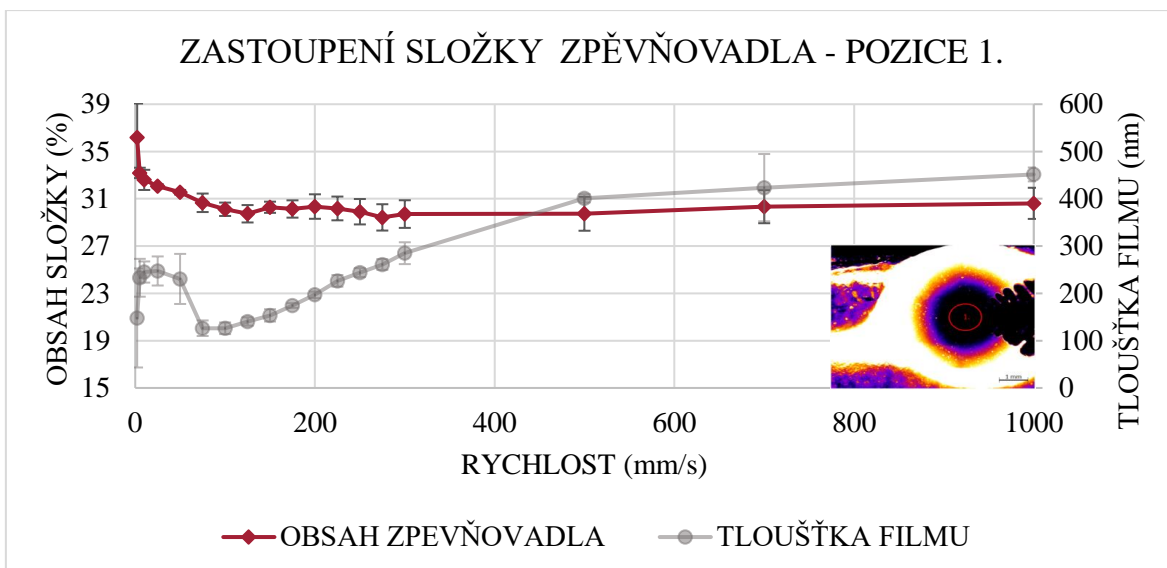
Obr. 5-13 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 1.

Fluorescenční barvivo pyren naopak dosahovalo nejvyšších intenzit za nejvyšší rychlosti. Pokud byla rychlost snižována snižovala se i intenzita barviva Obr. 5-13.

Pro získání tloušťky filmu, kterou dokázalo mazivo při testovaných podmínkách vytvořit bylo použito metody interferometrie. Na snímcích Obr. 5-14 z tohoto vyhodnocování při rychlosti 2 mm/s byly velmi dobře zachyceny jednotlivé částice zpevňovadla, které tak uměle navyšovaly tloušťku mazacího filmu. Pro rychlost 100 mm/s a 250 mm/s již tyto částice nebyly patrné.

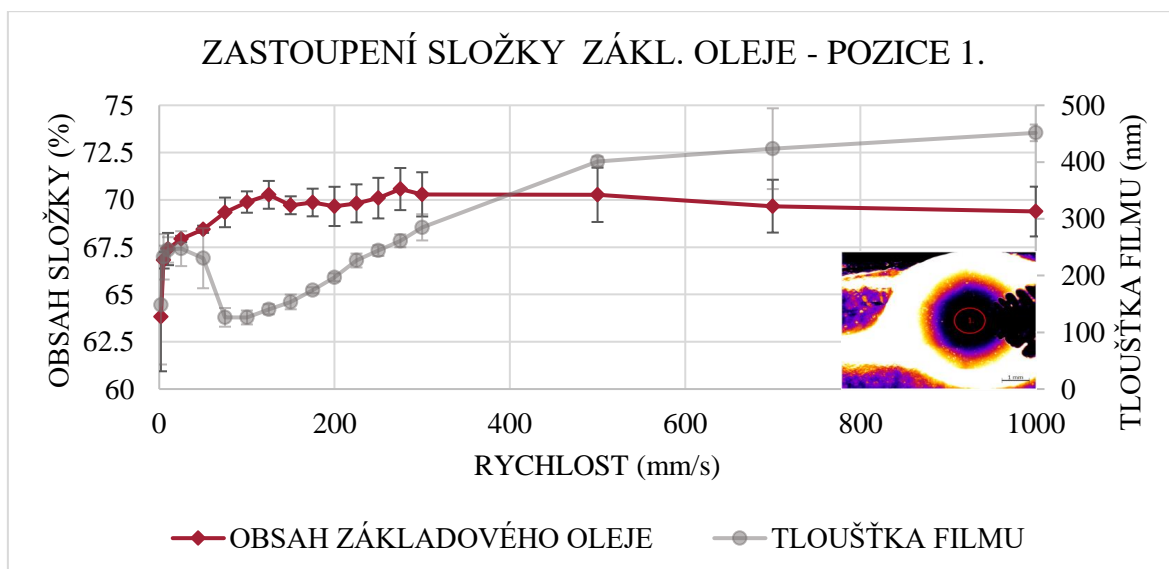


Obr. 5-14 Interferometrie maziva Li-1-CP



Obr. 5-15 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivu Li-1-CP, pozice 1.

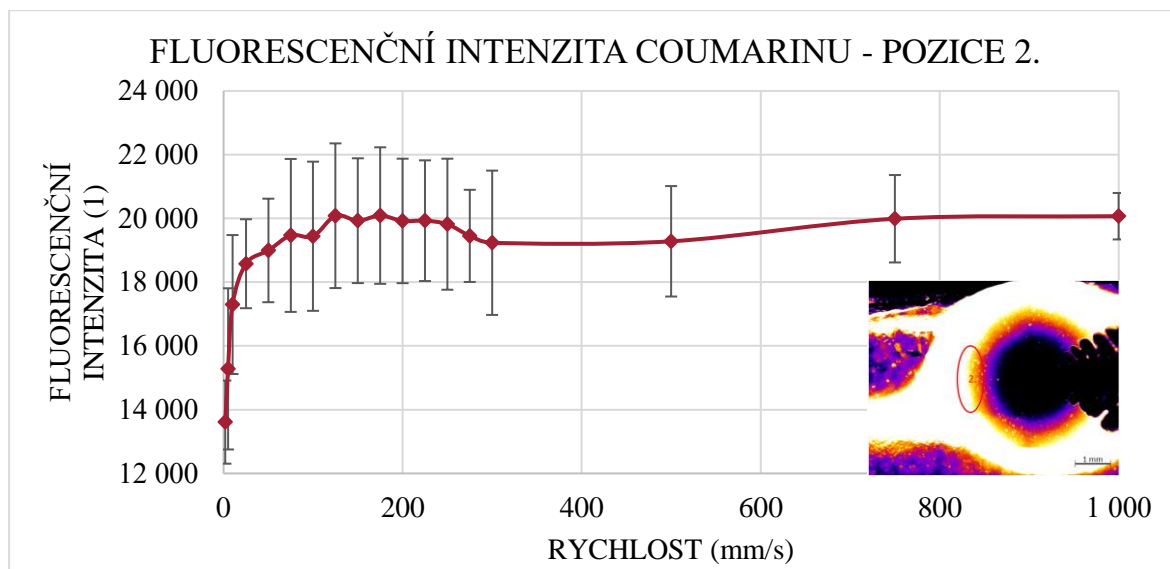
Procentuální zastoupení složek základového oleje a zpevňovadla bylo zaneseno do grafů Obr. 5-15 a Obr. 5-16. Z použité metody vyplývalo, že se vždy jednotlivé složky zrcadlí a tvoří celek 100 %. Za nízké rychlosti se v kontaktu nacházelo mnohem více složky zpevňovadla, než bylo naměřeno za rychlosti vyšší. Tloušťka mazacího filmu vykazovala zprvu pozvolný pokles do rychlosti 100 mm/s, od které se posléze již pouze zvyšovala do hodnoty 450 nm při rychlosti 1000 mm/s.



Obr. 5-16 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 1.

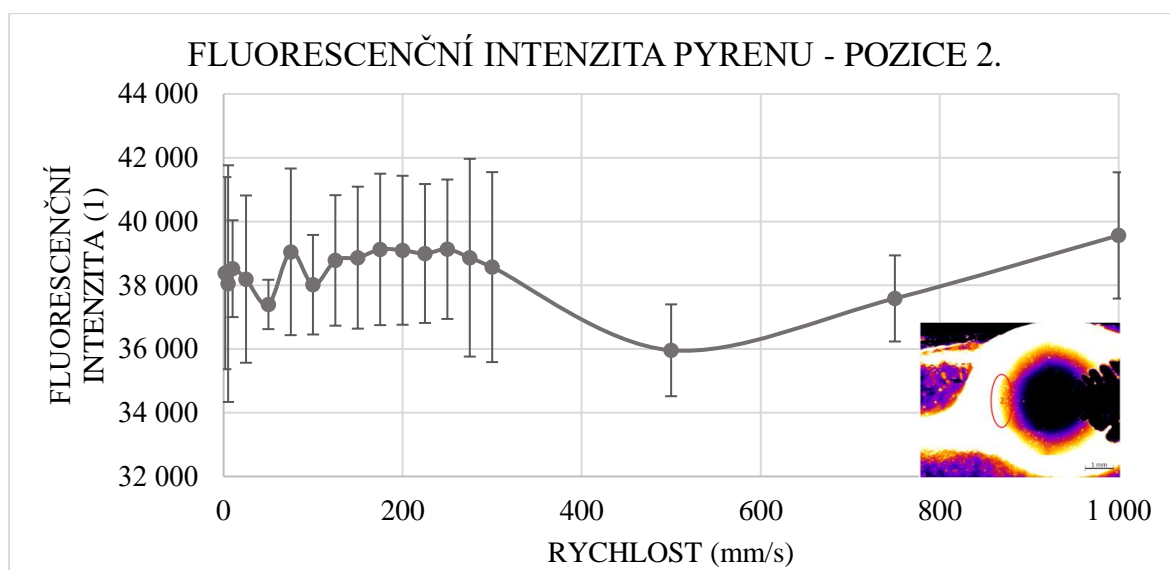
## Pozice 2. – Meniskus

Pro měření pozice 2. (oblast menisku) u maziva Li-1-CP docházelo u barviva coumarin Obr. 5-17 k nejnižším intenzitám v oblasti nízké rychlosti. Posléze se intenzita zvyšovala do rychlosti 125 mm/s a po dosažení této hodnoty již pouze kolísala kolem intenzity 20 000.

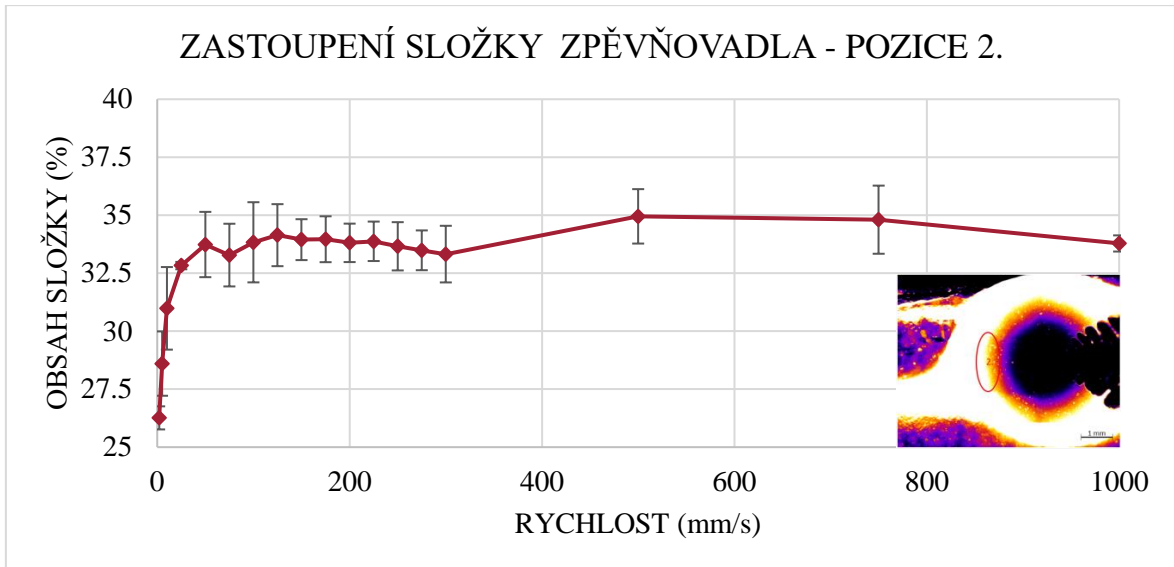


Obr. 5-17 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 2.

Naopak u barviva pyren Obr. 5-18 se hodnota intenzity za nízké rychlosti držela na hranici intenzity 39 000 a po dosažení 300 mm/s začala značně kolísat.

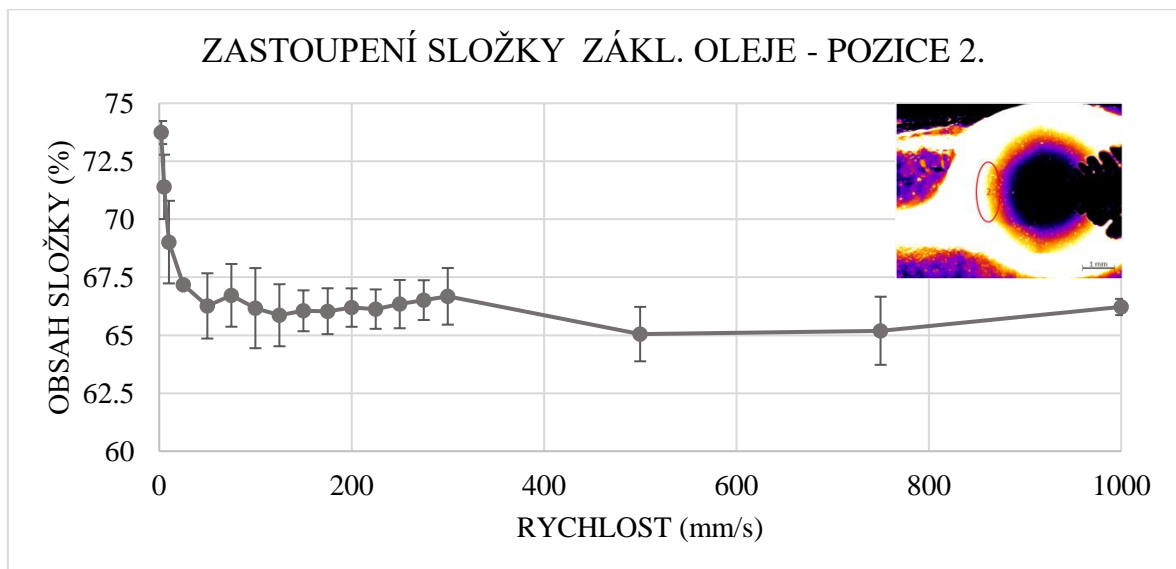


Obr. 5-18 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 2.



Obr. 5-19 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivu Li-1-CP, pozice 2.

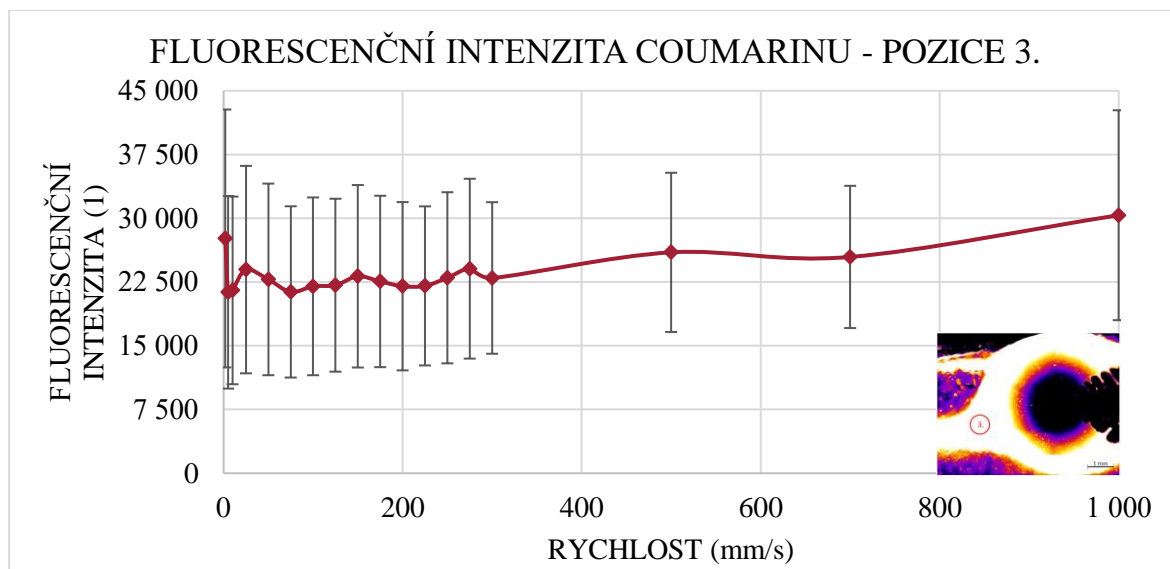
Zastoupení složky zpevňovadla v menisku Obr. 5-19 se zvyšovalo spolu s rychlostí do 125 mm/s. Od této rychlosti se jeho zastoupení ustálilo a mírně kolísalo kolem hodnoty 34 % zpevňovadla ku 66 % základového oleje Obr. 5-20.



Obr. 5-20 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 2.

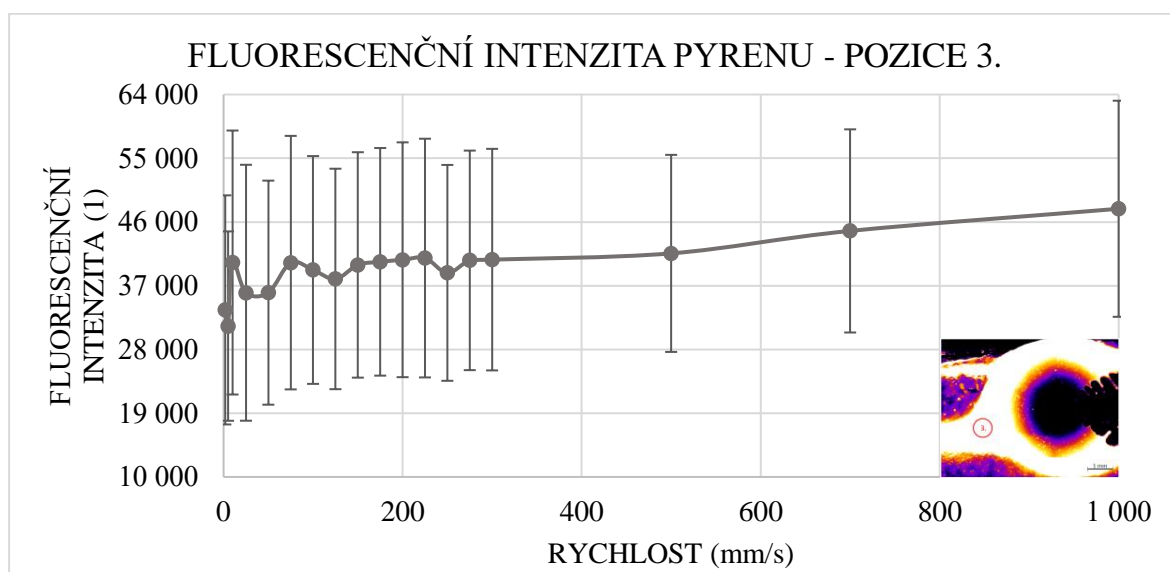
### Pozice 3. – Vtoková jamka

Při měření pozice 3. (oblast vtokové jamky) u maziva Li-1-CP docházelo u barviva coumarin Obr. 5-21 k velmi stálým hodnotám intenzit pohybujících se okolo hodnoty 25 000. Křivka spolu s rychlostí vykazovala kladný trend a emittance barviva se postupně zvyšovala. Získaná data však dosahovala značných odchylek mezi jednotlivými experimenty.

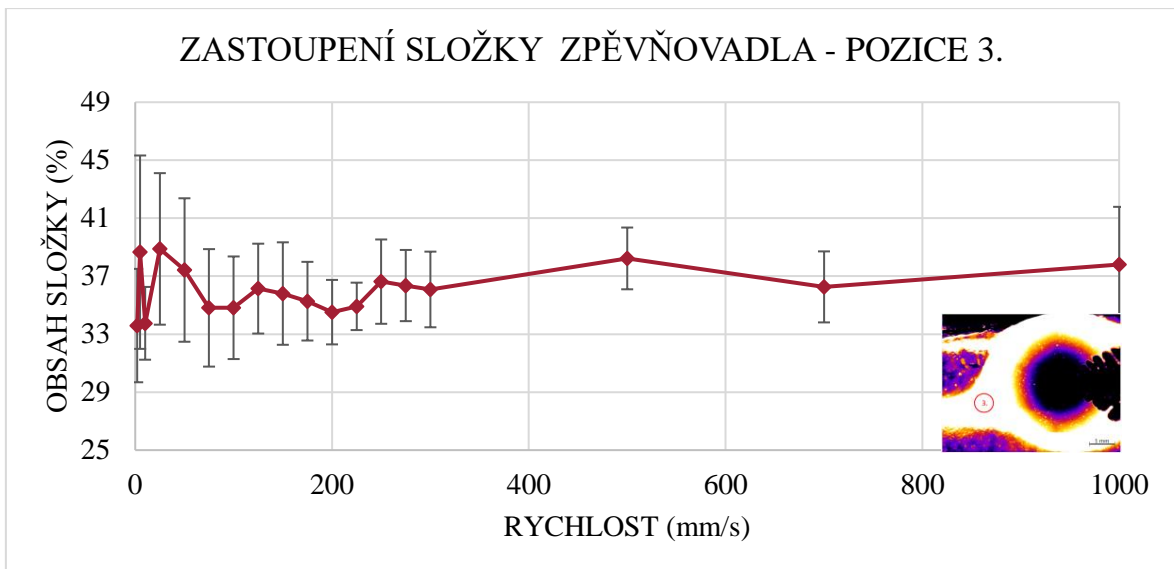


Obr. 5-21 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 3.

Barvivo pyren Obr. 5-22 vykazovalo podobné chování jako coumarin. Emitovaná intenzita světla barviva pyren se pohybovala v okolí 40 000 s kladným vývojem křivky a velkou odchylkou dat.

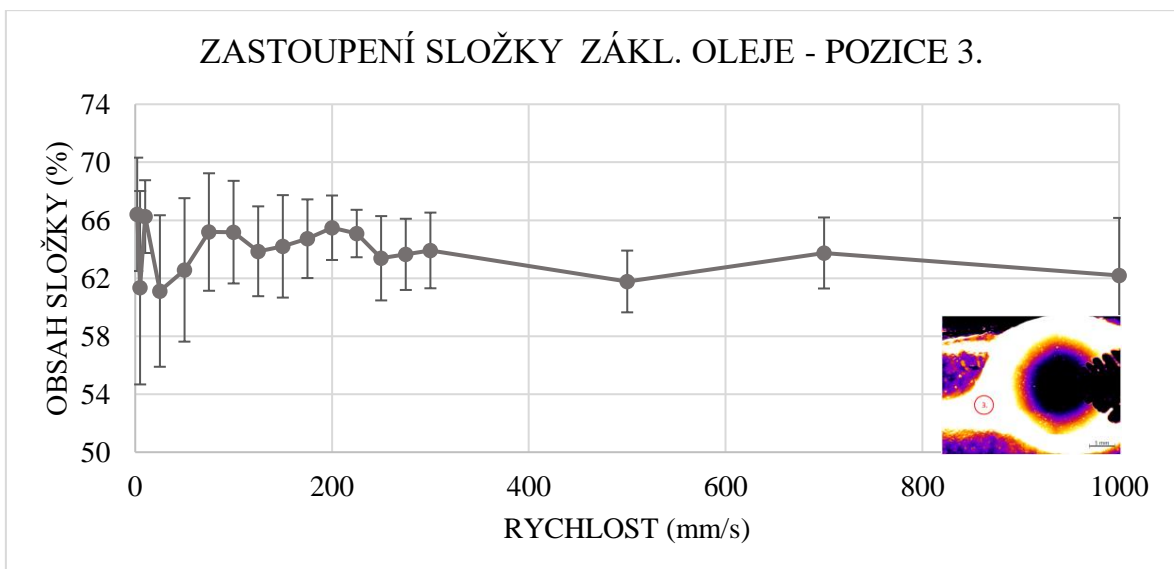


Obr. 5-22 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 3.



Obr. 5-23 Zastoupení složky zpevňovačla v mazivu Li-1-CP, pozice 3.

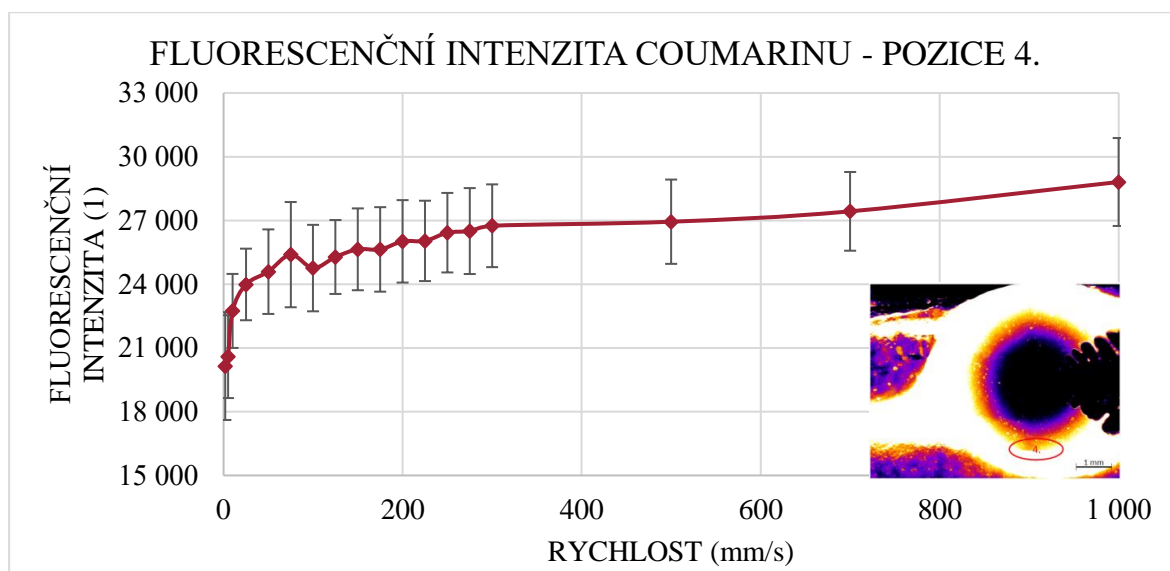
Procentuální zastoupení složky zpevňovačla Obr. 5-23 bylo ve vtokové jamce velmi stabilní a dosahovalo průměrného zastoupení 36 %. Složka základového oleje Obr. 5-24 se tedy v pozorované oblasti vyskytovala v zastoupení 64 %.



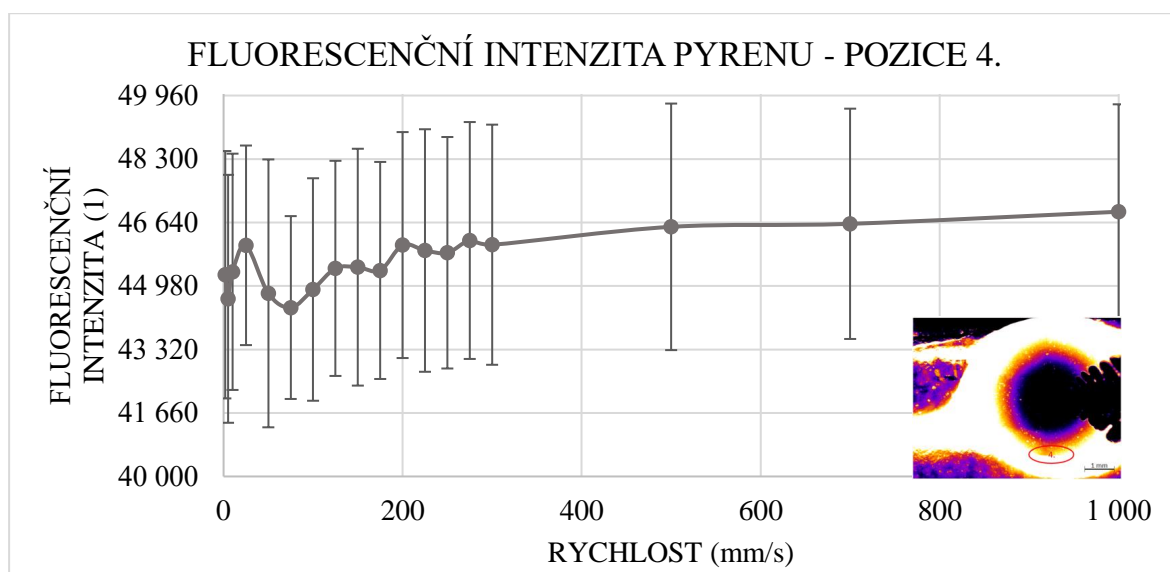
Obr. 5-24 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 3.

#### Pozice 4. – Okolí kontaktu

Pro měření pozice 4. (oblast okolí kontaktu) u maziva Li-1-CP docházelo u barviva coumarin Obr. 5-25 nejnižších intenzit při nízké rychlosti. Se zvyšující se rychlostí docházelo k postupnému nárůstu jeho intenzity. Barvivo pyren Obr. 5-26 naopak vykazovalo nestabilní chování v oblasti grafu s velmi nízkou rychlostí. Celkový trend intenzity byl však po změně rychlosti stále vzrůstající.

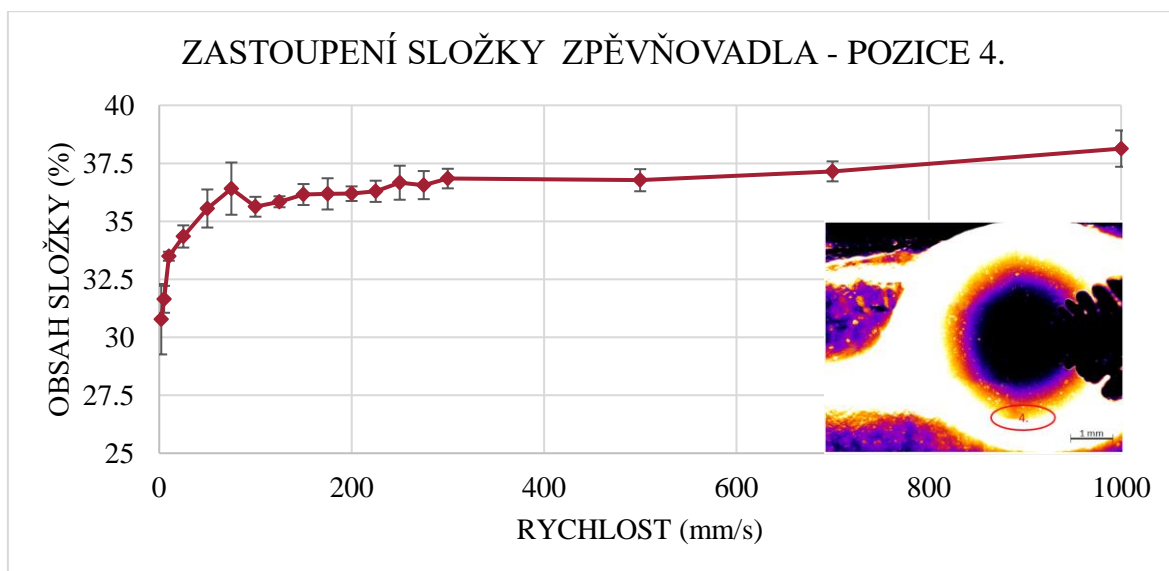


Obr. 5-25 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 4.

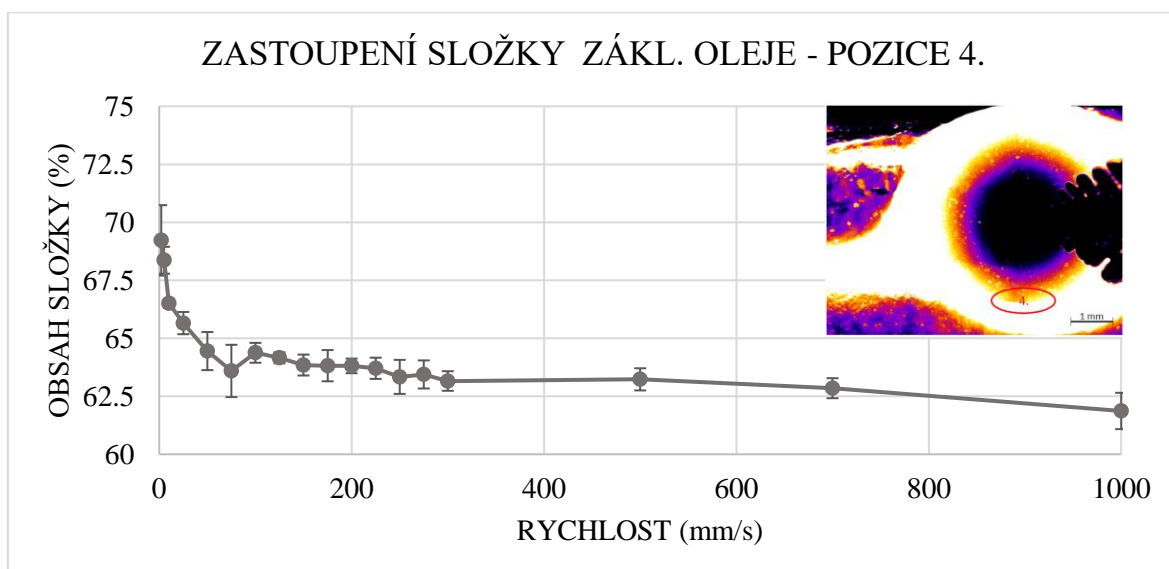


Obr. 5-26 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 4.

Zastoupení složky zpevňovadla v okolí kontaktu se zvyšovalo se zvyšující se rychlostí do 75 mm/s od této chvíle, se v mazivu v okolí kontaktu vyskytovalo cca 36 % složky zpevňovadla Obr. 5-27 a 64 % složky základového oleje Obr. 5-28.



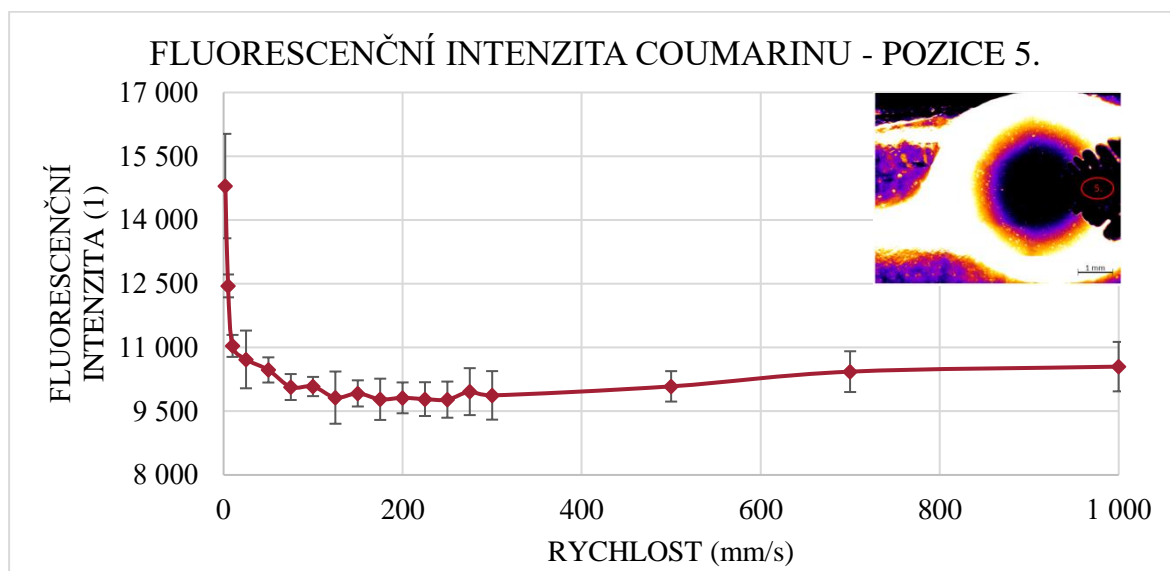
Obr. 5-27 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivu Li-1-CP, pozice 4.



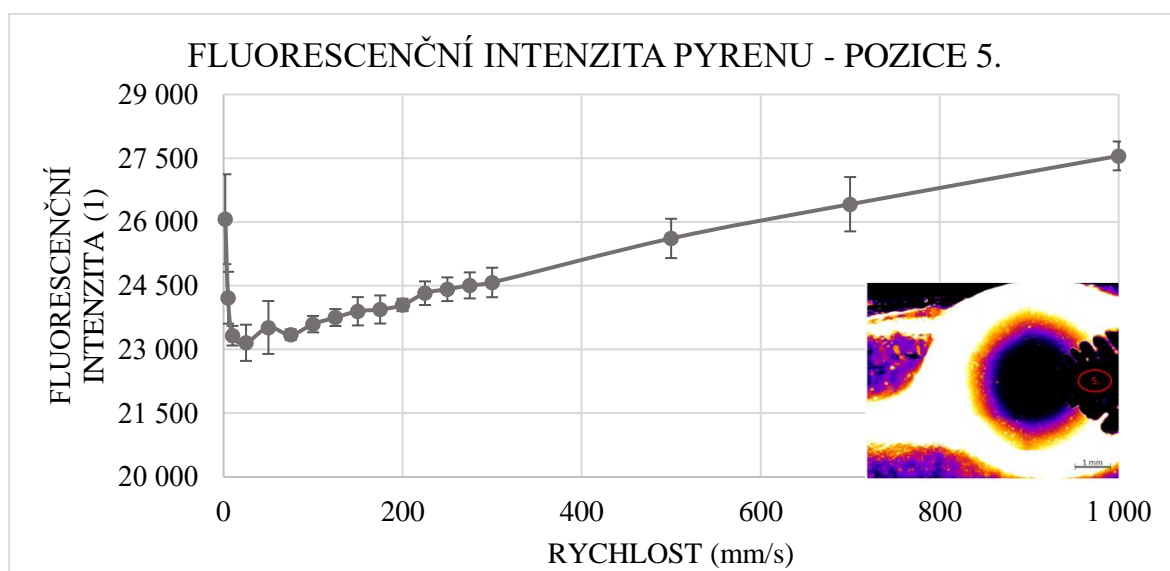
Obr. 5-28 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 4.

## Pozice 5. – Dráha za kontaktem

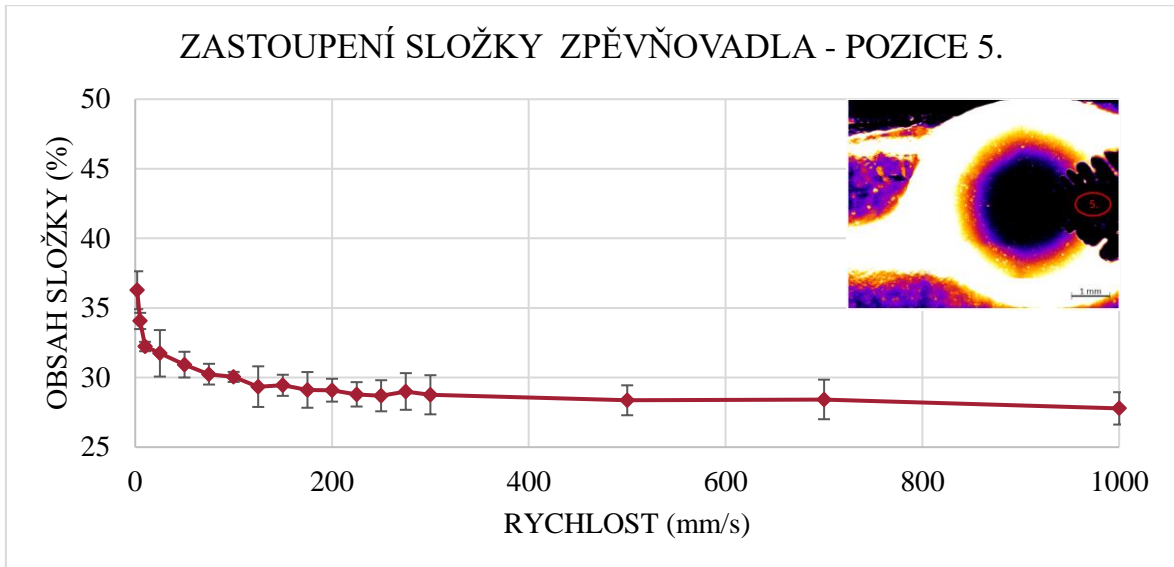
Pro měření pozice 5. (oblast dráhy za kontaktem) u maziva Li-1-CP docházelo u barviva coumarin Obr. 5-29 k nejvyšším intenzitám za nízké rychlosti. Posléze se intenzita snižovala do rychlosti 125 mm/s a po dosažení této rychlosti intenzita kolísala kolem hodnoty 10 500. Naopak u barviva pyren Obr. 5-30 intenzita prudce klesala do rychlosti 50 mm/s od níž začala skoro lineárně stoupat.



Obr. 5-29 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 5.

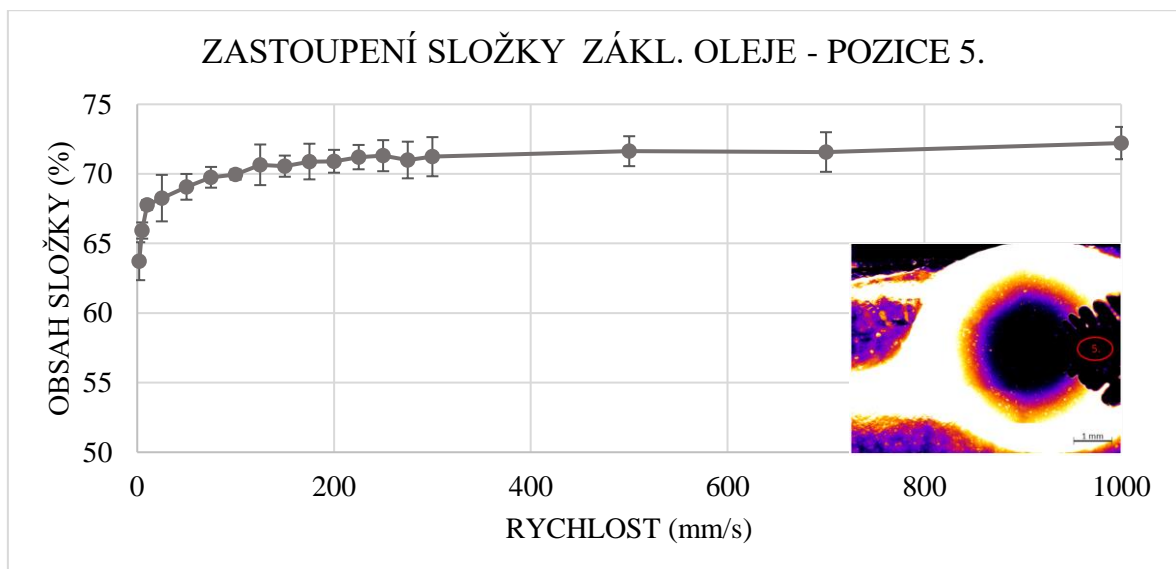


Obr. 5-30 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 5.



Obr. 5-31 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivu Li-1-CP, pozice 5.

Zastoupení složky zpevňovadla v dráze kontaktu se snižovalo se zvyšující se rychlostí do 125 mm/s od této chvíle, se v mazivu v dráze za kontaktem vyskytovalo průměrně cca 28 % složky zpevňovadla Obr. 5-31 a 72 % složky základového oleje Obr. 5-32.



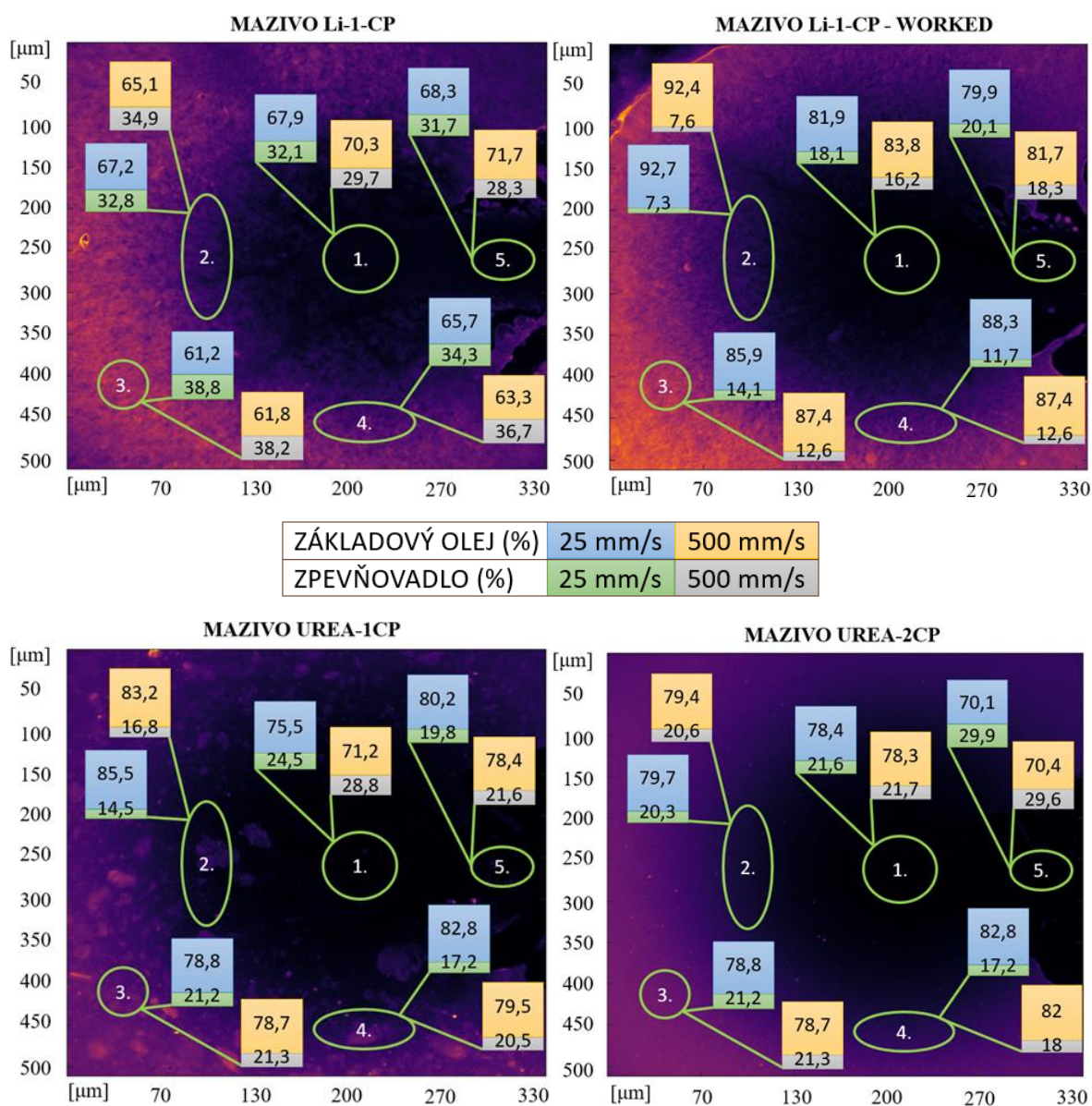
Obr. 5-32 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 5.

## 5.4 Souhrn experimentálního pozorování

Tato kapitola shrnovala nejdůležitější poznatky a výsledky o zastoupení jednotlivých složek v kontaktu a jeho okolí dosažených v této práci.

### 5.4.1 Přehledové obrázky

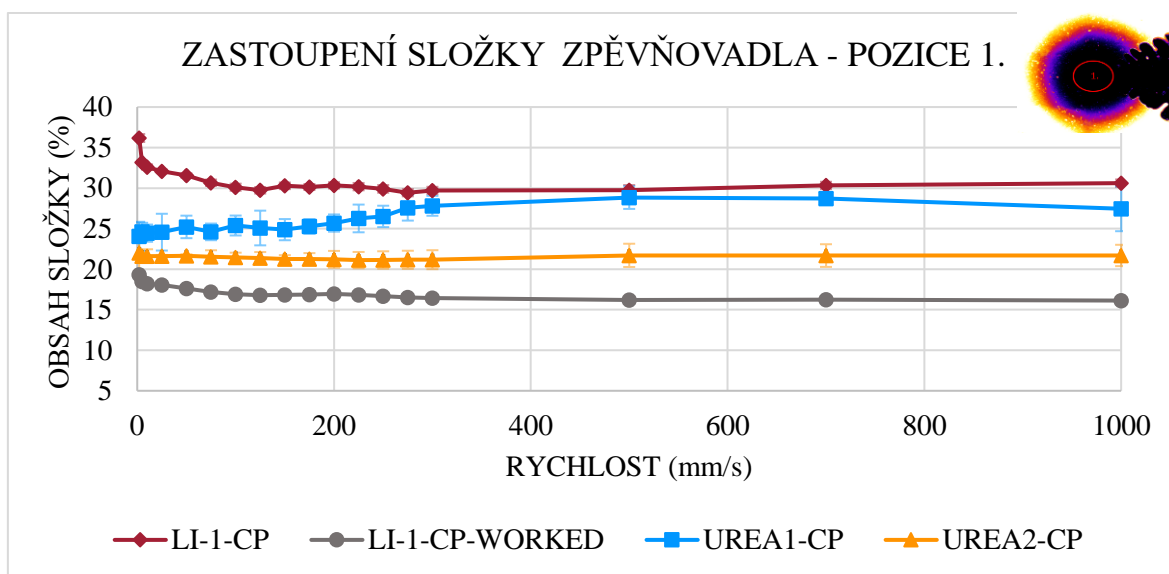
Na Obr. 5-33 bylo znázorněno procentuální zastoupení složky základového oleje (modrá a žlutá) a složky zpevňovadla (zelená a šedá), pro dvě testované rychlosti 25 a 500 mm/s (viz. legenda), u všech zkoumaných maziv. Z obrázků vyplývalo, že maziva o stejném zpevňovadle vykazovaly podobné trendy ve změně koncentrace v dané sledované pozici. Toto chování však nelze jednoznačně pozorovat i mezi vzorky s jiným druhem zpevňovadla.



Obr. 5-33 Grafické znázornění procentuálního zastoupení složek pro rychlost 25 a 500 mm/s

## 5.4.2 Přehledové grafy

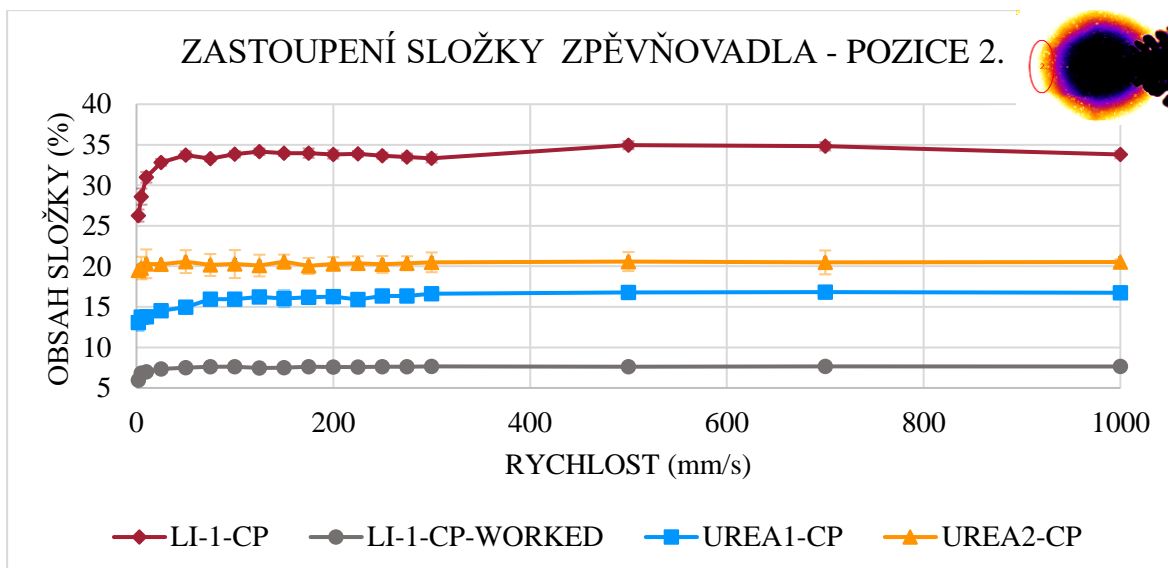
Pro zlepšení přehlednosti vývoje zastoupení jednotlivých složek ve všech pozicích byly vytvořeny grafy Obr. 5-34 - Obr. 5-38 jež zobrazovaly všechny testované druhy plastických maziv ve stejné pozorované pozici. Bylo zobrazeno pouze složky zpevňovačů, neboť složka základového oleje v použité metodě tvořila zbylá procenta do celkové hodnoty 100 %. Vývoj křivek by byl tedy naprosto identický, pouze by se zrcadlil. Oblast vyhodnocování jednotlivých pozic byla zobrazena již v Obr. 4-11 (str. 46), popř. v předchozím Obr. 5-33.



Obr. 5-34 Zastoupení složky zpevňovačů v mazivech v pozici 1.

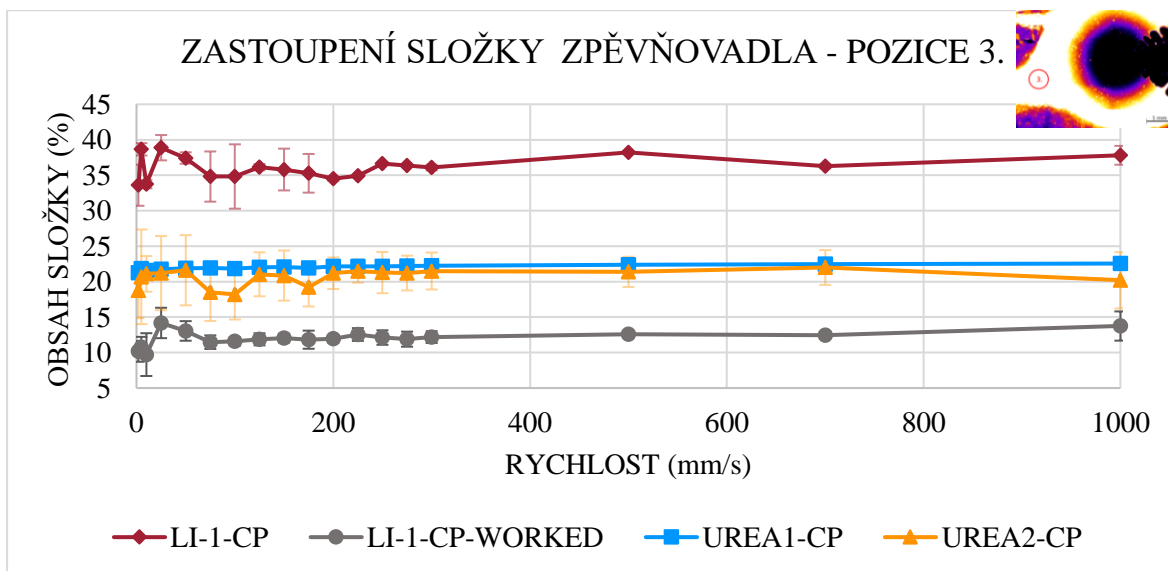
V případě sledování pozice 1. (kontakt kuličky a disku) Obr. 5-34 plastická maziva na bázi lithiového komplexu vykazují podobné exponenciálně se snižující chování. Maziva na bázi močovinnového základu dosahují naopak velmi odlišných trendů.

Při sledování pozice 2. (meniskus) Obr. 5-35 vykazovala všechna maziva podobný trend chování. Bez ohledu na druh zpevňovačů všechna maziva v oblasti menisku exponenciálně navyšovala procentuální zastoupení složky zpevňovačů spolu s rostoucí rychlostí.



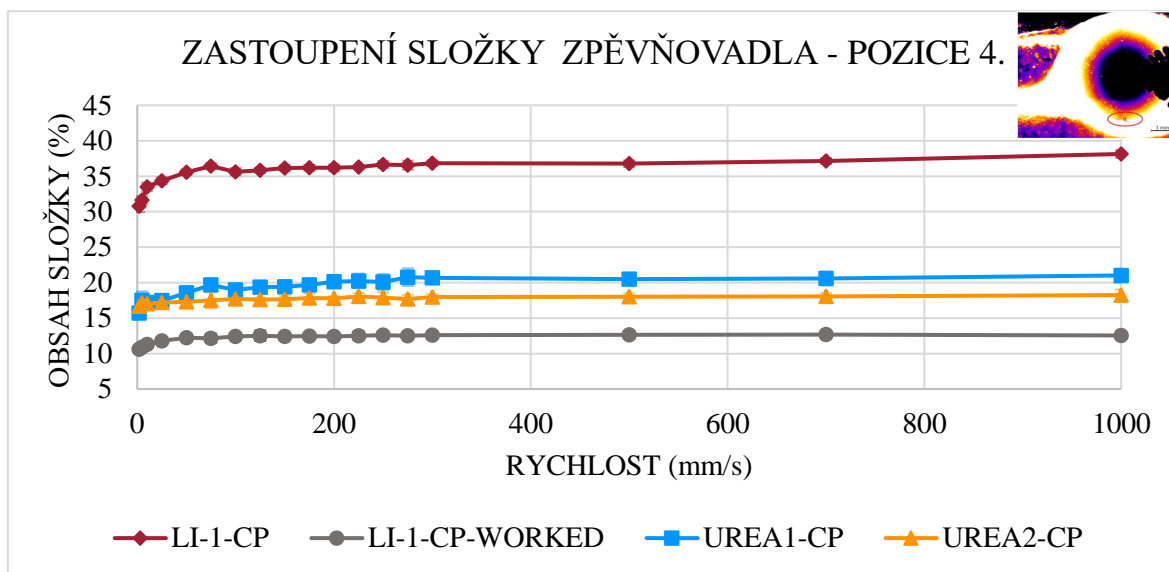
Obr. 5-35 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivech v pozici 2.

V případě pozorování vtokové jamky Obr. 5-36, pozice 3., se všechna maziva chovala naprosto odlišným způsobem. Všechna se ale po dosažení určité rychlosti ustálila na skoro konstantním zastoupení obou složek.



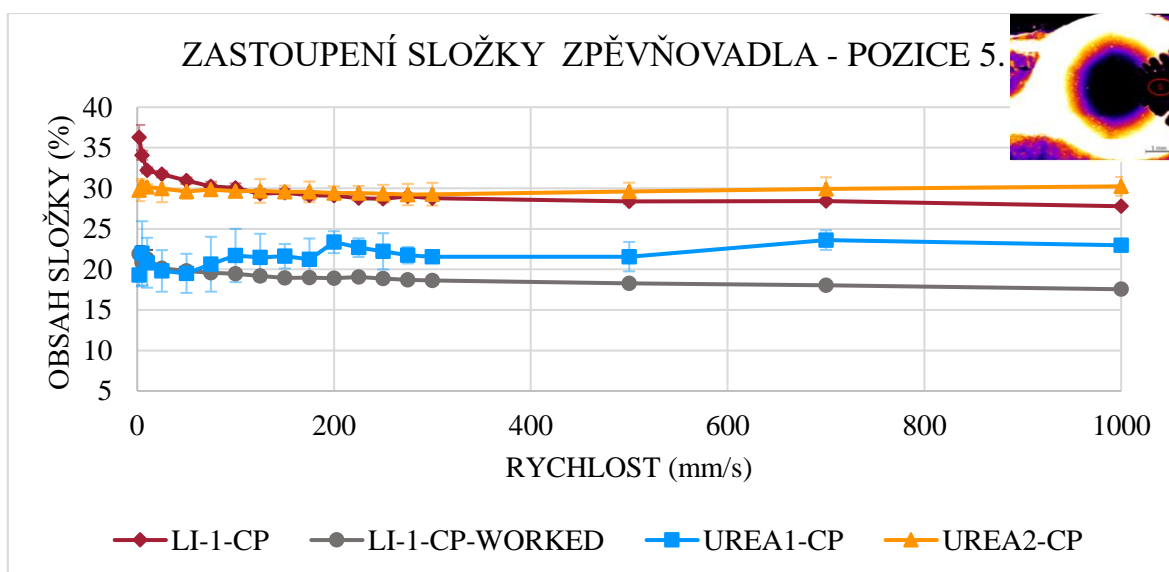
Obr. 5-36 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivech v pozici 3.

V okolí kontaktu Obr. 5-37 , pozice 4., opět všechna plastická maziva vykazovala podobný trend ve vývoji procentuálního zastoupení složky zpevňovačla a složky základového oleje ve sledované oblasti. Bez ohledu na použitý druh zpevňovačla, zastoupení této složky v oblasti exponenciálně rostlo ve všech testovaných vzorcích.



Obr. 5-37 Zastoupení složky zpevňovačla v mazivech v pozici 4.

Pozice 5., jež řešila dráhu za kontaktem Obr. 5-38, uváděla podobnost mezi druhem použitého zpevňovačla. Maziva obsahující lithiový komplex vykazovala exponenciální pokles zastoupení dané složky, naopak plastická maziva na bázi močoviny, se mezi sebou lišila v odlišném vývoji procentuálního zastoupení.



Obr. 5-38 Zastoupení složky zpevňovačla v mazivech v pozici 5.

## 6 DISKUZE

Tato kapitola zpočátku interpretovala získaná data, která byla rozdělena do tří sekcí. Nejprve bylo řešeno nově vzniklé mazivo Li-1-CP-worked a jeho vlastnosti. Následně byl zkoumán vliv parazitní fluorescence na získaná data a v neposlední řadě byly zhodnoceny výsledky zastoupení jednotlivých složek v kontaktu a jeho blízkém okolí. Po této interpretaci a diskuzi výsledků následovala kapitola shrnující a hodnotící položené otázky a jejich hypotézy.

### 6.1 Interpretace výsledků

#### 6.1.1 Kontrola nově vzniklého maziva

Plastické mazivo Li-1-CP-worked vzniklé mechanickou degradací po dobu 168 h, vykazovalo silnou změnu viskozity oproti mazivu Li-1-CP, ze kterého bylo zpracováno. U těchto maziv bylo zkontrolováno, zda nedošlo k fluorescenčním změnám pomocí spektrometru.

Při kontrole emisní intenzity barviva pyren Obr. 5-1 docházelo u zpracovaného maziva k nižší intenzitě než u vzorku maziva původního. Přičemž výsledek ovlivnil především čas, po který bylo na vzorek svíceno. Hlavní ukazatel změny fluorescenčních vlastností je vývoj emisní křivky. Pyren dosáhl naprosto identického fluorescenčního maxima v 483 nm. Mechanická degradace tedy nikterak neovlivnila jeho fluorescenční schopnost.

Fluorescenční barvivo coumarin Obr. 5-2 vykazovalo opět naprosto totožná maxima intenzity po vlnové délce s nejvyšším fluorescenčním maximem ve vlnové délce 521 nm. Za velkou blízkost získaných intenzit mohla stálost tohoto barviva v čase. V krátké časovém horizontu tedy neovlivňovala doba záření získané výsledky intenzity tohoto barviva. Ani v tomto případě mechanická degradace neovlivnila fluorescenční vlastnosti barviva.

Mechanická degradace tedy neměla žádný vliv na fluorescenční vlastnosti daného vzorku, a proto mohlo být mazivo Li-1-CP-worked využito pro následné experimenty, bez potřeby zhotovení nových kalibračních snímků z části parazitní fluorescence.

Přesto že mechanická

degradace neměla vliv na fluorescenční vlastnosti, ovlivnila zásadně reologii maziva spolu s mechanismem mazání, při kterém se uvolňuje olej ze struktury. Plastické mazivo při následných testech kap. 6.1.3 vykazovalo velmi dobré předpoklady k přechodu do režimu hladovění, které zmínil **Lugt et al.** [3].

## 6.1.2 Parazitní fluorescence

Získaná data z těchto provedených měření silně dokazovala vliv měřicí aparatury při užití více fluorescenčních barviv. Testy jednotlivých barviv byly nejprve provedeny na oleji PAO8, který nevykazoval žádné autofluorescenční vlastnosti [19].

Při pozorování aparaturou pro coumarin tvořilo získanou intenzitu v PAO8-CP 99,6 % signál od barviva coumarin. Zbylých 0,4 % tvořilo barvivo pyren spolu s intenzitou oleje. Excitace a emise coumarinu tedy nikterak zásadně neovlivňovala barvivo pyren v oleji. Získaný signál při zkoumání PAO8-P a PAO8 mohl být ovlivněn odrazem excitačního paprsku světla od povrchu modulu sandwich a následného dopadu na senzor kamery (zejména v případě PAO8). Díky omezené účinnosti jednotlivých filtrů v optické cestě, jež nedokážou odrazit veškeré nežádoucí světlo došlo k průchodu části světla skrze filtr. Toto propuštěné světlo mohlo excitovat samotné barvivo pyren, a proto dokázalo emitovat záření větší intenzity než samotný vzorek PAO8. Získanou intenzitu mohla navíc ovlivnit kvantová účinnost použité kamery, jež se pohybovala v rozmezí 40 – 50 % ve zkoumaných vlnových délkách [31] a tím mohla ztratit 50 % získaných informací. Tento vliv by se měl však eliminovat využitím stejné kamery u všech testovaných vzorků jedné sady maziva v této části práce.

PAO8-CP ukazoval vliv měřicí aparatury zejména v případě použití aparatury pro pyren. Nejvíce získaného signálu 64,1 % emitovalo barvivo pyren a zbylá procenta náležela barvivu coumarin (35,7 %) spolu s olejem. Bylo zde tedy patrné, že aparatura pyrenu excitovala i fluorofory coumarinu Obr. 2-17 (překryv těchto křivek) a tím navyšovala získanou intenzitu světla. Tímto byl prověřen výskyt parazitní fluorescence, jež bylo nutné odstranit.

Při přesunu této metody na plastická maziva docházelo u Li-1-CP k mnohem větším výkyvům při aparatuře pro coumarin. Zde se nacházela silná autofluorescence lithiového komplexu, která v tomto mazivu tvořila cca 23 % získaného světelného signálu. Emitace světelného zdroje způsobila excitaci barviva pyren a tím bylo navýšeno celkové získané intenzity světla v této aparatuře. Čím více činitelů se však podílelo na světelném zisku tím větších odchylek jednotlivá světla dosahovala. Při použití aparatury pro pyren se vliv autofluorescence plastického maziva a vliv této aparatury na ostatní barviva natolik neprojevil a primární signál tvořilo barvivo pyren. K tomuto utlumení vlivu aparatury oproti PAO8-CP mohlo vést navázání částic fluoroforů coumarinu na strukturu zpevňovačla, kdežto ve vzorku oleje byly tyto částice volně rozloženy bez toho, aniž by byly navázány na některou složku viz. práce **Košťál et al.** [19].

U plastického maziva Li-1-CP a Li-1-P navíc byl kontrolován téměř lineární vývoj fluorescenční intenzity po tloušťce filmu Obr. 5-7 jež se téměř naprosto shodoval s publikací **Košťál et al.** [18] řešící optimální zastoupení barviva pyren v mazivu. A toto chování bylo potvrzeno provedenými testy v této práci.

Plastická maziva na bázi močovinnového zahušťovadla nevykazovala zásadní schopnost autofluorescence a jejich podíl na světelném zisku kolísal kolem hodnoty 1 %. Pokud byla močovinnová maziva porovnána mezi sebou dosahovala velmi podobných hodnot parazitní fluorescence v přijatelných odchylkách 2 %. Mazivo, které obsahovalo jemnější mikrostrukturu (Urea2) dosahovalo u aparatury pro pyren více získané intenzity světla od tohoto barviva než mazivo obsahující hrubší mikrostrukturu (Urea1). K těmto výsledkům mohlo vést množství oleje nacházející se ve volném prostoru mezi jemnou strukturou maziva.

Změna mikrostruktury plastického maziva, tedy velikosti jeho zrn měla minimální vliv na podíl získané parazitní intenzity. Ten se pohyboval v rozmezí 2 %, jež bylo přijatelnou odchylkou v rámci chyby měření. Tyto data u maziva na bázi močoviny ukazovala, že metoda mohla být provedena pouze pro jeden vzorek obsahující daný druh oleje a zpevňovadla. A dále tyto hodnoty lze používat pro ostatní maziva obsahující stejný olej a zpevňovadlo bez ohledu na mikrostrukturu a velikost částic daného zkoumaného vzorku s danou nejistotou měření. Díky tomuto zjištění již nebylo potřeby dále provádět parazitní fluorescenci pro mazivo Li-1-CP-worked.

### 6.1.3 Experimenty

V případě testů provedených na modulu ball-on-disk byl důležitý přírůstek či pokles rychlosti. Při počátku testu, v oblasti nízké rychlosti, muselo docházet k ulpívání částic zpevňovadla na kuličce. Získaná intenzita barviva coumarinu Obr. 5-10 totiž dosahovala o něco vyšších hodnot než v případě, kdy test započal v oblasti s rychlostí vyšší. Pro zamezení ovlivnění celého testu nalepením částic zpevňovadla na kuličku byly testy provedeny v sestupném pořadí od rychlosti 1000 mm/s. Přesto že se v praxi nejedná o nikterak negativní efekt.

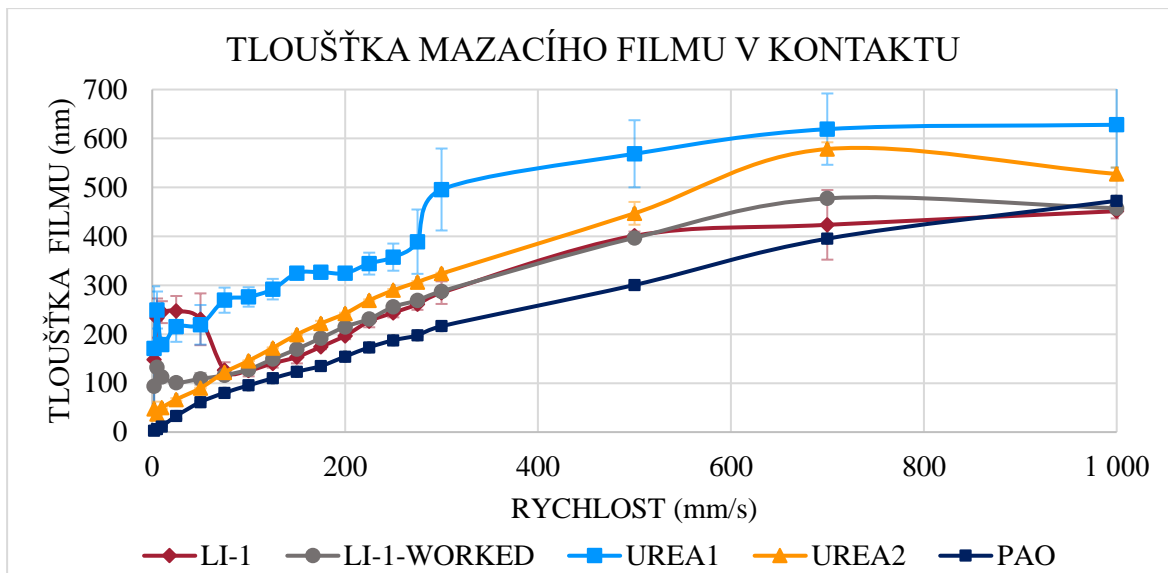
#### Funkčnost metody

Funkčnost metody byla testována na statickém snímku každého zkoumaného maziva. Hodnoty koncentrací jednotlivých složek silně ovlivňovala mikrostruktura daného vzorku. V případě velkých zrn zpevňovadla, tedy maziv Li-1 a Urea1, metoda dosahovala s velkou přesností hodnot koncentrace, které udává při výrobě maziv jejich výrobce. Tyto maziva však dosahovala vysokých odchylek od těchto hodnot, jež způsobily velké částice nacházející se ve vyhodnocované oblasti Obr. 5-11 (částice na pozici 300; 300 a 330; 400). Částice takto lokálně zvýšila zastoupení zpevňovadla a tím celkové měření kontaktu dosáhlo velké odchylky. Při zúženém vyhodnocovacím poli (mimo tyto velké částice) mazivo dosahovalo podobných pouze přesnějších hodnot (menší odchylka dat).

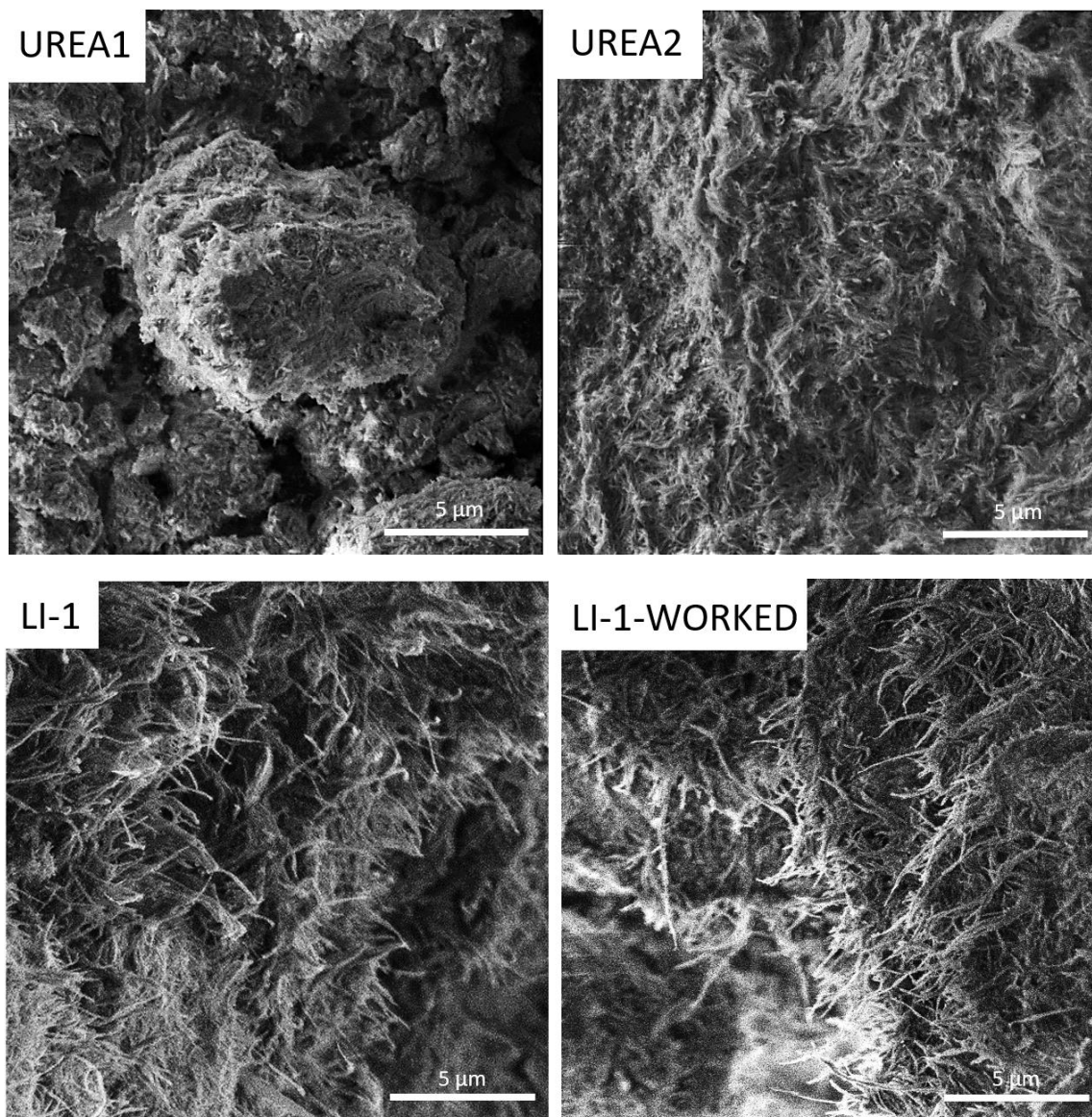
V případě použití metody na mazivo jemné mikrostruktury Urea2 dosahovala metoda velmi přesných hodnot při vyhodnocování celého statického snímku díky absenci velkých částic ovlivňujících lokálně získaný signál. Výskyt jemné mikrostruktury však ovlivnil zastoupení složek maziva. Zpevňovadlo bylo natolik nepatrné, že mazivo vykazovalo nižší zastoupení, než udává výrobce. Nicméně podobné chování vykazovalo i mechanicky degradované mazivo Li-1-worked, což prokázalo vliv jemnosti částic nejen na tloušťku mazacího filmu viz. **Sakai et al.** [13], ale i na zastoupení složky zpevňovadla v kontaktu (hypotéza 1). Na mazivu Li-1-worked navíc lze lehce pozorovat chování zpevňovadla u maziva, které prošlo mechanickou degradací nebo již nějakou dobu operovalo v kuličkovém ložisku. Jeho struktura se značně zjemní a sníží se obsah zpevňovadla v mazivu. Hlavním nositelem tloušťky filmu je zde již základový olej obohacený o jemné degradované částičky zpevňovadla, které napomáhají k navýšení mazacího filmu.

### Tloušťka mazacího filmu

Pokud se přešlo ke zkoumání tloušťky mazacího filmu, dokázala maziva tvořit tloušťku mazací vrstvy větší než základový olej v nich obsažený, a to od 36 nm až po 630 nm Obr. 6-1, přičemž základový olej tvořil tloušťku mazací vrstvy od 5 do 450 nm. Maziva na bázi močoviny (Urea1 a Urea2) dosahovala mnohem větší tloušťky mazací vrstvy než maziva na bázi lithiového komplexu, jež potvrzuje studie **Zhang Z. et al.** [4]. V těchto mazivech (Urea1 a Urea2) se však nacházela absence rychlosti přechodu neboli bodu zlomu „V” a tloušťka mazacího filmu s neustále se zvyšující rychlostí rostla. Dosahovala ale rozdílu mezi jednotlivou hrubostí mikrostruktury. Mazivo obsahující hrubší mikrostrukturu (Urea1) by dle studií **Sakai et al.** [13, 20] a **Cyriac et al.** [7] mělo dosahovat, při stejných provozních podmínkách, nižší mazací vrstvy než mazivo obsahující jemnější mikrostrukturu (Urea2). Tyto studie byly ale provedeny pouze pro mazivo na bázi lithiového komplexu, popř. obsahovaly minerální základový olej. Navíc řešily vliv velikosti jednotlivých vláken nikoli shluků zpevňovadla, a proto toto odlišné chování močovinného maziva se syntetickým PAO olejem nikterak nevyklučují. Nižší tloušťku filmu u Urea2 mohla způsobit až natolik jemná a netypická mikrostruktura v porovnání s ostatními mazivy Obr. 6-2. Kdy tato struktura propůjčovala mazivu téměř olejové vlastnosti, a neobsahovala natolik velké částice zpevňovadla, aby dokázala navýšit tloušťku mazací vrstvy. Což dokazuje naměřená tloušťka mazacího filmu v nízké rychlosti dosahující pouhých 36 nm.



Obr. 6-1 Tloušťka mazacího filmu maziv



Obr. 6-2 Mikrostruktury jednotlivých maziv

Při testování maziva na bázi lithiového komplexu docházelo při tvorbě mazacího filmu ke zřetelnému „V” přechodu za rychlosti 75 mm/s Obr. 6-1. Vyšší tloušťka filmu v oblasti nízké rychlosti byla způsobena velikostí částice nacházející se v kontaktu, jež dokládají snímky z interferometrie Obr. 5-14 (str. 60), kde celkovou tloušťku za rychlosti 2 mm/s tvoří především zřetelné částice zpevňovačla. Nedegradované mazivo Li-1 s většími částicemi dosahovalo menší tloušťky filmu než mazivo degradované Li-1-worked v oblasti vyšší rychlosti a tím byly potvrzeny studie **Sakai et al.** [13, 20] a **Cyriac et al.** [7].

Při použití mechanicky degradovaného maziva Li-1-worked docházelo k často rychlému vyhladování pozorované oblasti, jež souhlasilo s literaturou **Rezasoltani et al.** [23]. Mechanická degradace ovlivnila především oblast nízké rychlosti do bodu zlomu „V” (původního maziva), která závisí převážně na zpevňovačle. Od tohoto přechodu mazivo tvořilo o něco větší tloušťku mazací vrstvy než původní nezpracované mazivo. Dále u něj byl přesunut i „V” přechod z rychlosti 75 mm/s na 25 mm/s. Velikost částice tedy zásadně ovlivnila přechodovou oblast, od které závisí tloušťka mazacího filmu na viskozitě oleje dle **Kanazawa et al.** [6]. Mechanická degradace maziva, k níž běžně dochází v dlouhodobějším procesu mazání, tedy nikterak zásadně neovlivní tvorbu mazací vrstvy za vysoké rychlosti, dokud se v mazivu nachází dostatečné množství základového oleje (nevyschne / nespotřebuje se). Degradace maziv ovlivní převážně pouze vznikající tloušťku filmu za nízké rychlosti.

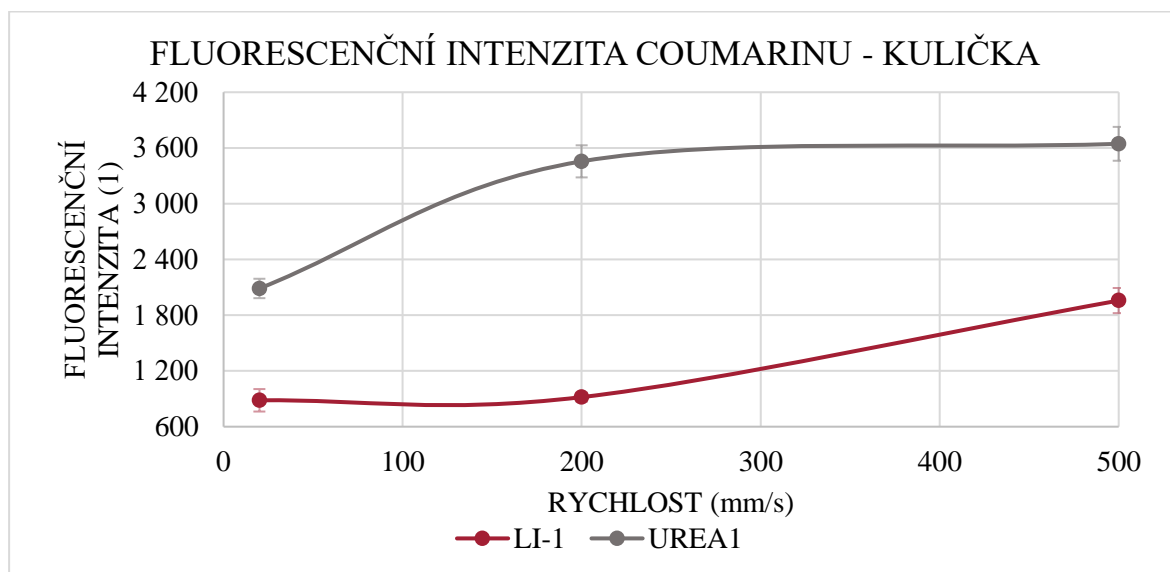
#### Zastoupení jednotlivých složek v kontaktu a jeho okolí

Při zkoumání zastoupení jednotlivých částic v kontaktu a jeho okolí bylo zjištěno, že maziva vykazují rozdílné chování, které je spjato s velikostí částic. Mazivo na bázi lithiového komplexu Li-1 Obr. 5-34, s částicemi o velikosti 100 - 150 nm, dosahovalo nejvyššího procentuálního zastoupení zpevňovačla v kontaktu. Naopak maziva na bázi močoviny, a to jak s hrubou mikrostrukturou Urea1, tak s jemnou mikrostrukturou Urea2, vykazovala nižší obsah zpevňovačla. Nejnižší procentuální zastoupení zpevňovačla bylo zjištěno u mechanicky degradovaného maziva Li-1-worked. Toto pořadí se shodovalo u většiny zkoumaných pozic. Z těchto testů vyplývá, že velikost částic zpevňovačla a mechanická degradace výrazně ovlivňuje jeho zastoupení v kontaktu a jeho blízkém okolí. Toto tvrzení je podpořeno chováním maziv na bázi lithiového komplexu, kde vývoj procentuálního zastoupení byl naprosto identický jak pro Li-1, tak pro Li-1-worked, s pouhým procentuálním rozdílem v zastoupení dané složky v mazivu.

Plastická maziva s velmi malými částicemi zpevňovačla navíc poskytovala velmi přesná měření, i přes opakované testování. Naopak u maziv obsahujících velké částice zpevňovačla bylo obtížnější dosáhnout přesných měření. Vstup velkých částic zpevňovačla do vyhodnocované oblasti totiž způsoboval zvýšení signálu, což vedlo k větším odchylkám v měřených intenzitách těchto maziv, zejména při opakovaných testech.

Mazivo na bázi lithiového komplexu Li-1 prokázalo pokles jak tloušťky mazací vrstvy, tak i procentuálního zastoupení zpevňovačla až do dosažení přechodové rychlosti (bodu zlomu „V“). Od tohoto momentu se koncentrace složky zpevňovačla mírně zvyšovala spolu s tloušťkou mazacího filmu. Naopak u maziv na bázi močoviny, která nevykazovala bod přechodu „V“, došlo k postupnému zvýšení jak koncentrace složky zpevňovačla v kontaktu, tak tloušťky mazací vrstvy. Tyto měření naznačují spojitost mezi rychlostí, tloušťkou mazací vrstvy a bodem zlomu „V“ s převratem reologického chování plastického maziva.

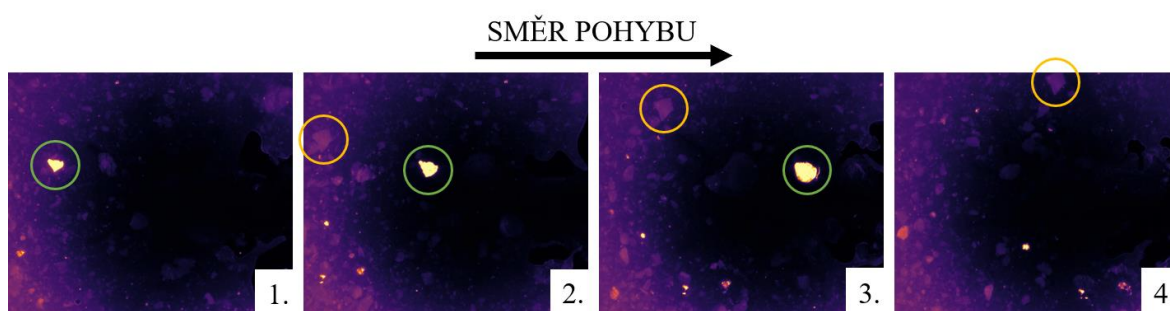
Zastoupení složky zpevňovačla v kontaktu bylo uměle navyšováno přítomností částic, které zůstaly přilepeny na kuličce. I přes snahu o minimalizaci tohoto jevu, jak naznačuje sestupné provedení experimentu Obr. 5-10, byly patrné odlišnosti mezi chováním kontaktu kuličky s diskem Obr. 5-34 a dráhou za kontaktem Obr. 5-38. Při vyšších rychlostech docházelo v této dráze za kontaktem k značným odchylkám od hodnot získaných v oblasti samotného kontaktu. Pro lepší pochopení vlivu ulpívání částic na kuličce byla po průjezdu kontaktem pořízena řada snímků povrchu kuličky. Získaná intenzita barviva coumarinu, které ulpívalo na kuličce, rostla s rychlostí viz. Obr. 6-3. Signál získaný z kuličky tvořil přibližně třetinu informace o zastoupení dané složky v kontaktu. Proto lze usoudit, že procentuální rozdíl mezi zastoupením zpevňovačla v kontaktu mezi kuličkou a diskem a dráhou za kontaktem mohl být způsoben částicemi, které zůstaly nalepeny na kuličce. Tento jev uplývání částic na kuličce je pro praxi vnímán především pozitivně, neboť naznačuje schopnost maziva postupně tvořit tlustší a tlustší film, který dokáže ochránit a dobře oddělit dva pohybující se povrchy. Načež však tyto usazeniny mírně ovlivňují provedené experimenty, samotný efekt je zajímavý a naznačuje příznivé vlastnosti maziva v dlouhodobém horizontu.



Obr. 6-3 Intenzita barviva coumarin na povrchu kuličky

Dalším faktorem ovlivňujícím procentuální zastoupení složky zpevňovačla v kontaktu byla snaha jednotlivých částic vstupovat do kontaktu. Pokud došlo ke vstupu velké částice do kontaktu (Obr. 6-4 zelený kroužek, 1.), mohlo se i zvýšit procentuální zastoupení této složky v kontaktu. Na Obr. 6-4 v pozici 2. byla zobrazena částice těsně před průchodem kontaktem, zatímco v pozici 3. již kontaktem prošla a byla značně deformována a degradována (ztratila část základového oleje z mikrostruktury). Tyto částice buď zůstávaly přilepeny na skle a později vstupovaly do vyhodnocované oblasti dráhy za kontaktem, nebo se mohly znovu připojit k mazivu v bočním toku a tím se vyhnout vyhodnocované oblasti. Což přispělo mimo jiné ke snížení koncentrace zpevňovačla v dráze za kontaktem.

Částice měly větší tendenci vstupovat do kontaktu za velmi malých rychlostí. Naopak při vyšších rychlostech se částice snažily spíše kontaktu vyhnout nebo se shlukovat v oblasti menisku. Tato skutečnost je dále potvrzena zrcadlovým chováním zastoupení zpevňovačla na Obr. 5-34 a Obr. 5-35.



Obr. 6-4 Pohyb částic zpevňovačla v kontaktu

Obr. 6-4 také ukazuje, že většina částic zpevňovačla projevuje neochotu vstupovat do kontaktu jež podpořilo studie **Sakai et al.** [13, 20]. Tyto částice se následně převážně pohybují v oblasti menisku a fungují jako zásobárna základového oleje pro kontakt. V této oblasti se částice pohybují ve vírech a pokud se právě nenacházejí v přímém kontaktu, odcházejí spolu s ostatním mazivem bočním tokem okolo kuličky. Oranžové kolečko na Obr. 6-4 v pozici 2. znázorňuje částici odcházející bočním tokem. Tento fenomén proudění maziva je dále podpořen studií **Cyriac et al.** [7], která uvádí, že minimálně 30 % zpevňovačla nikdy neprojde kontaktem a zůstává v bočním toku nebo je vytlačeno do okolní dráhy.

Navíc je zde pozorována spojitost mezi obsahem zpevňovačla v oblasti kontaktu Obr. 5-34, oblasti menisku Obr. 5-35 a dráhou v okolí kontaktu Obr. 5-38. Při nízkých rychlostech je zpevňovačlo více koncentrováno v kontaktu, což naznačuje, že částice mají větší tendenci vstupovat do kontaktu. Naopak při vyšších rychlostech se více zpevňovačla nachází v oblasti menisku a okolí kontaktu, neboť částice mají spíše snahu o obcházení přímého kontaktu. Popř. se již degradované nacházejí v jeho okolí [3].

Tato práce dále prokázala spojitost mezi stabilitou menisku a mikrostrukturou maziva. Čím jemnější strukturu mazivo má, tím menší odchylky v zastoupení zpevňovačla v těchto oblastech jsou pozorovány. Díky kontinuálně velkému menisku bez velkých částic.

V případě pozorování vtokové jamky Obr. 5-37 se často vyskytovala situace nedostatečného zásobení mazivem (hladovění), zejména u mechanicky degradovaného maziva Li-1-worked. Tyto měření měla zajistit co nejvíce konzistentní výsledky v rámci jednoho maziva, díky pravidelnému dodávání stejného objemu pomocí použitého stěrače. Přesto se vyskytl problém s nerovnoměrnou vrstvou a nedostatkem maziva. V této oblasti procentuálně stabilní výsledky projevovala zejména maziva obsahující malé částice zpevňovačla, jelikož byla schopna vytvořit velmi jemnou homogenní vrstvu.

#### 6.1.4 Limitace

Navržená metodika měření a vyhodnocování získaných snímků byla testována pouze na dvou typech plastického maziva, na kterých se prokázala její účinnost. Nicméně, kvůli absenci více testovaných vzorků, nebyla možnost provést testy na jiných kombinacích maziv, jako je např. mazivo s minerálním olejem, nebo jiným druhem zahušťovadla, či více maziv s „V” přechodem.

Metoda byla během měření silně limitována nastavením světelné aparatury. Intenzita světla musela být pevně nastavena na začátku testu a nesměla se měnit po dobu trvání experimentu ani mezi jednotlivými měřeními, pro zajištění porovnatelnosti výsledků. Navzdory snahám o eliminaci řady různých parametrů, některé z nich zůstaly stále neřešeny. Např. nebyla řešena svítivost daného fluorescenčního barviva nebo jeho koncentrace v mazivu, což může ovlivnit získané informace. Metoda též neřeší informace o objemovém zastoupení jednotlivých složek, pouze udává procentuální zastoupení v dané pozorované oblasti. Dále práce zkoumá pouze jedno zatížení a jednu testovanou teplotu, a nezabývá se vlivem těchto parametrů na změnu zastoupení jednotlivých složek. Parametrická studie by vyžadovala rozsáhlejší výzkum, který by přesahoval rámec této práce. Pokud by takovéto testy byly provedeny, mohly by přispět k lepšímu porozumění chování částic za vysokého tlaku či teplotě.

Metoda navíc neukazuje chování fluorescenčních barviv pod různými kontaktními tlaky. Z Obr. 6-4 lze pozorovat změnu intenzity částice před a po průchodu kontaktem. Je viditelné, že část své fluorescenční intenzity ztratila. Zkoumat fluorescenční chování jednotlivých barviv za různého tlaku by však již bylo nad rámec této práce.

Dále je třeba poznamenat, že tato metoda je vhodná pouze pro sledování plně zaplaveného kontaktu, kde se předpokládá stejné chování plastického maziva při dané rychlosti. V případě aplikace metody na hladovějící kontakt, by bylo nezbytně nutné pořizovat snímky jak barviva coumarin, tak barviva pyren těsně za sebou, aby nedocházelo k chybám ve vyhodnocení programu způsobených např. posunutím menisku.

Navíc v této práci dochází k velmi nízké reprodukovatelnosti měření. V případě použití maziva z jiné série mohou výsledky dosahovat odlišných hodnot, popř. odchylek.

## 6.2 Verifikace hypotéz

H.1: V kontaktu se vytváří tloušťka filmu přímo závislá na složení maziva, jež ovlivňuje celkový mechanismus mazání spolu s jeho viskozitou. I přes to, že výrobce udává koncentrace jednotlivých složek, v kontaktu se nachází odlišný poměr zpevňovačů k základovému oleji. Tato variabilita totiž závisí na celkové velikosti částice zpevňovačů a testovaných podmínkách. Pokud při testování maziva obsahujícího opravdu velké částice zpevňovačů nastane malá tloušťka mazacího filmu. Tak za stejných testovaných podmínek (rychlost, teplota a zatížení) u maziva s malými částicemi nastane tloušťka mazací vrstvy o něco vyšší [7, 13]. V případě výskytu velké částice zpevňovačů v malé vrstvě dojde k optickému navýšení procentuálního zastoupení této složky v oblasti a složka oleje se sníží z důvodu omezeného prostoru. Malé částice naopak budou tak nepatrné ve velké tloušťce filmu v porovnání s olejem, že se obsah zpevňovačů opticky zmenší, natolik že poklesne jeho procentuální zastoupení udané výrobcem.

Získané výsledky z kap. 5.3.2 a Příloha 3 naznačují, že velikost částic má klíčový vliv na procentuální zastoupení jednotlivých složek. Analýza čtyř vzorků s dvěma různými zpevňovači ukázala podobné chování. Maziva s hrubou mikrostrukturou (Li-1 a Urea1) dosahovala vyššího procentuálního zastoupení než vzorky s jemnou mikrostrukturou (Li-1-worked a Urea2). U maziv na bázi lithiového komplexu navíc maziva s jemnější mikrostrukturou tvořila tlustší mazací vrstvu než ta s mikrostrukturou hrubou, což je v souladu se studii [7, 13]. U maziv na bázi močoviny však došlo k odlišnému chování. Mazivo s jemnějšími částicemi (Urea2) vytvořilo menší tloušťku mazací vrstvy než Urea1. Studie [7, 13] však neřeší natolik jemné mikrostruktury, aby tento výsledek byl s nimi v rozporu. Celkově byla hypotéza řešící velikost částic na procentuální zastoupení složky zpevňovačů plně potvrzena a přijata.

H.2: Za nízké rychlosti se předpokládá v kontaktu opticky větší obsah složky zpevňovačů, než udává výrobce. Na Obr. 2-7 (str. 19) je patrné, že za nízké rychlosti se modře označené lithiové mazivo a zeleně označené mazivo urea chovají odlišně od jejich čisté složky základového oleje označeného v grafu červeně. Plastická maziva tvoří tloušťku mazací vrstvy několikanásobně větší než základový olej, což může být způsobeno především zpevňovačem [5, 6, 14]. Proto se předpokládá, že se zpevňovač bude v kontaktu nacházet ve vyšším zastoupení. Pro vyšší rychlosti se pozoruje podobné chování při tvorbě tloušťky filmu jak u plastického maziva, tak u základového oleje [5, 6, 14]. Proto by se základový olej měl nacházet v kontaktu ve vyšším zastoupení a nahradit tak složku zpevňovačů, která by se měla v kontaktu nacházet v degradovaném stavu, popř. nedegradovaném v okolí kontaktu [3].

Hypotéza vychází ze získaných dat prezentovaných v kap. 5.3.2, Příloha 3 a dále v kap. 5.4.2, která poskytuje souhrnný pohled na všechna maziva ve sledovaných pozicích. Z těchto dat vyplývá, že provozní rychlost má vliv na zastoupení jednotlivých složek. V oblasti nízkých rychlostí maziva dosahují vyššího zastoupení složky zpevňovačů než v oblasti vyšších rychlostí, zejména v případech, kdy dochází k přechodové rychlosti „V“, pro kterou byla hypotéza stanovena. U močovinných maziv, která neprojevují „V“ přechod, se koncentrace složek s rychlostí neustále zvyšuje. Proto byla hypotéza plně přijata pouze pro maziva na bázi lithiového komplexu.

## 7 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena především na studium procentuálního zastoupení jednotlivých složek plastického maziva (zpevňovadlo a základový olej) v kontaktu a jeho blízkém okolí pomocí fluorescenční mikroskopie. Kalibrační snímky byly pořizovány v modulu sandwich a eliminují vliv měřicí aparatury (zdroj světla, filtr) při využití více fluorescenčních barviv. Vzorek maziva obsahoval přesněji dvě fluorescenční barviva samovolně se rozpouštějící v jednotlivých složkách (pyren – základový olej, coumarin – zpevňovadlo). Experimentální formování mazací vrstvy a jejího složkového zastoupení bylo pozorováno skrze průhledný skleněný borosilikátový disk v provedení ball-on-disk. Hlavní zjištění jsou sepsána v následujících podkapitolách.

### Metoda

Při studiu fluorescenčních vlastností jednotlivých barviv v mazivu byl zjištěn:

- Vliv funkčního spektra použité aparatury (světlo a filtr) na obě fluorescenční barviva. Měřicí aparatura pro barvivo coumarin dokáže z části nabudit i barvivo pyren a tím navýšit získaný fluorescenční signál od zpevňovadla.
- Vliv velikosti částice na získaný rozptyl intenzit a opakovatelnost provedených měření. Větší částice zpevňovadla v mazivu vede k horší opakovatelnosti a širšímu rozptylu dat.

### Vědecké závěry

Při zkoumání procentuálního zastoupení složek plastického maziva v kontaktu a jeho okolí bylo zjištěno:

- Spojitosti velikosti částice a procentuálního zastoupení složek. Čím větší částice jsou v mazivu obsaženy, tím vyšší obsah složky zpevňovadla je zaznamenán. Běžně přítomná provozní mechanická degradace maziva způsobuje zjemnění částic zpevňovadla, což vede ke snížení jeho zastoupení.
- Závislosti změny zastoupení složek na provozní rychlosti. Koncentrace zpevňovadla v mazivu není konstantní, ale mění se spolu s rychlostí. Obsah zpevňovadla v kontaktu klesá do přechodové rychlosti „V” a po přechodu touto rychlostí začíná růst. U vzorků na bázi močoviny se koncentrace zpevňovadla s rychlostí neustále zvyšuje.

- Propojení vývoje koncentrace zpevňovadla s přechodovou rychlostí (tzv. „V” přechod) převážně u maziva na bázi lithiového komplexu. U maziva urea pozorován tento přechod nebyl, pravděpodobně z důvodu velmi jemné mikrostruktury, která by se mohla velmi dobře usazovat na kontaktním páru, a tak v čase neustále navyšovat získanou tloušťku mazací vrstvy.
- Spojitosti výskytu složek v oblasti menisku a okolí kontaktu spolu s přímým kontaktem kuličky a disku. Za nízké rychlosti zpevňovadlo snáze projde kontaktem, přičemž za rychlosti vyšší kontakt spíše obchází bočním tokem.

**Nejdůležitějším výstupem této práce tedy je potvrzení, že za typický „V” přechod plastického maziva může koncentrace zpevňovadla.**

#### Omezení a návaznost práce

- Nefunkčnost metody pro hladovějící podmínky, díky nedostatečnému technickému vybavení umožňující snímky obou barviv v rozmezí několika ms
- Lze navázat zkoumáním vlivu parametrů na zastoupení jednotlivých složek (teplota, tlak, velikost částic), či studií hladovějících podmínek

## 8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

PALÁN, Miroslav, David Košťál, Ivan KŘUPKA, Martin HARTL, Concentration of grease particles in EHD contact and its surroundings

Abstract

This paper investigates a commonly used grease for lubricating rolling bearings, focusing on the effect of thickener particle size on lubricant film thickness and constituent distribution in the contact area. The study aims to improve grease design for precise film thickness applications by understanding thickener particle influence. Using a fluorescent dye, thickener and base oil were observed under a fluorescence microscope during ball-on-disc test rig experiments, measuring constituent concentration in and around the EHD contact. The research examines the relationship between operating speed and constituent percentage, finding that thickener particle concentration affects the "V" shape of the lubrication layer thickness curve.

Článek se nachází v podobě manuskriptu pro časopis Tribology Letters.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Ke gramatické korektuře a čtivosti textu v této diplomové práci byly využity pokročilé schopnosti chatbota ChatGPT 3.5 vyvinutého společností OpenAI.

- [1] HUTTON, J.F. Lubricating grease guide. *Tribology International*. Second. 1985, roč. 18, č. 1, s. 57–58. ISSN 0301-679X.
- [2] BAUER, Walther H., Alfred P. FINKELSTEIN a Stephen E. WIBERLEY. Flow properties of lithium stearate-oil model greases as functions of soap concentration and temperature. *Wear*. 1961, roč. 3, č. 2, s. 215–224. ISSN 0043-1648.
- [3] LUGT, Piet M. *Grease Lubrication in Rolling Bearings*. B.m.: John Wiley and Sons, 2012. ISBN 9781118353912.
- [4] ZHANG, Z ;, Y ; WANG, J ; LIN, D WANG, Zhe ZHANG, Yanshuang WANG, Jianghai LIN a Dongfeng WANG. Study on Factors Influencing Film Formation of Grease and Calculation Model for Grease Film Thickness. *Lubricants 2022, Vol. 10, Page 123*. 2022, roč. 10, č. 6, s. 123. ISSN 2075-4442.
- [5] FISCHER, Dennis, Georg JACOBS, Andreas STRATMANN a Gero BURGHARDT. Effect of base oil type in grease composition on the lubricating film formation in EHD contacts. *Lubricants*. 2018, roč. 6, č. 2. ISSN 20754442.
- [6] KANAZAWA, Yuta, Richard S. SAYLES a Amir KADIRIC. Film formation and friction in grease lubricated rolling-sliding non-conformal contacts. *Tribology International*. 2017, roč. 109, s. 505–518. ISSN 0301-679X.
- [7] CYRIAC, F., P. M. LUGT, R. BOSMAN, C. J. PADBERG a C. H. VENNER. Effect of Thickener Particle Geometry and Concentration on the Grease EHL Film Thickness at Medium Speeds. *Tribology Letters*. 2016, roč. 61, č. 2, s. 1–13. ISSN 10238883.
- [8] LUGT, P. M. a G. E. MORALES-ESPEJEL. A Review of Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory. *Tribology Transactions*. 2011, roč. 54, č. 3, s. 470–496. ISSN 1547397X.
- [9] JACKSON, Andrew. Elasto-hydrodynamic lubrication (EHL). *Lubrication Engineering*. 1991, roč. 47, č. 10, s. 833–835. ISSN 00247154.
- [10] CANN, P. M.E., B. DAMIENS a A. A. LUBRECHT. The transition between fully flooded and starved regimes in EHL. *Tribology International*. 2004, roč. 37, č. 10, s. 859–864. ISSN 0301679X.
- [11] HAMROCK BJ a DOWSON D. Isothermal EHL of point contacts: fully flooded results. *ASME Trans J Lubricat Technol*. 1976.

- [12] CANNT, P M, B P WILLIAMSON, R C COYS a H A SPIKEST. The behaviour of greases in elastohydrodynamic contacts I The behaviour of greases in elastohydrodynamic contacts. *Journal of Physics D: Applied Physics J. Phys. D Appl. Phys.* 1992, roč. 25, s. 124–156. ISSN 0022-3727.
- [13] SAKAI, Kazumi, Yasuha TOKUMO, Yusuke AYAME, Yuji SHITARA, Hiroyoshi TANAKA a Joichi SUGIMURA. Effect of formulation of li greases on their flow and ball bearing torque. *Tribology Online*. 2016, roč. 11, č. 2, s. 168–173. ISSN 18812198.
- [14] CANN, P. M. Grease lubrication of rolling element bearings - Role of the grease thickener. *Lubrication Science*. 2007, roč. 19, č. 3, s. 183–196. ISSN 09540075.
- [15] OKAL, Michal, David KOSTAL, Petr SPERKA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Effect of Contact Conformity on Grease Lubrication. *Lubricants 2022*. 2022, roč. 10, č. 11, s. 289. ISSN 2075-4442.
- [16] HODAPP, Annika, Andreas CONRAD, Bernhard HOCHSTEIN, Karl Heinz JACOB a Norbert WILLENBACHER. Effect of Base Oil and Thickener on Texture and Flow of Lubricating Greases: Insights from Bulk Rheometry, Optical Microrheology and Electron Microscopy. *Lubricants*. 2022, roč. 10, č. 4. ISSN 20754442.
- [17] CHENNAOUI, Mourad, Mark FOWELL, He LIANG, Amir KADIRIC a Amir KADIRIC AKADIRIC. A Novel Set-Up for In Situ Measurement and Mapping of Lubricant Film Thickness in a Model Rolling Bearing Using Interferometry and Ratiometric Fluorescence Imaging. 2022, roč. 70, s. 85. ISSN 1023-8883.
- [18] KOSTAL, David, Shugo ONITSUKA, Hiroyoshi TANAKA, Joichi SUGIMURA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Use of Pyrene for Quantitative Fluorescence Observation of Li-Grease around EHL Contacts. *Tribology Online*. 2020, roč. 15, č. 3, s. 117–125. ISSN 18812198.
- [19] KOSTAL, David, Michal OKAL, Josef FRYZA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Novel In-Situ Observation of the Grease Constituents in Elastohydrodynamic Contacts by Fluorescence Microscopy. *Tribology Letters*. 2022, roč. 70, č. 4. ISSN 15732711.
- [20] SAKAI, Kazumi, David KOSTAL, Yuji SHITARA, Motohiro KANETA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Influence of Li grease thickener types on film thicknesses formed between smooth and dented surfaces. *Tribology Online*. 2017, roč. 12, č. 5, s. 262–273. ISSN 18812198.
- [21] DELGADO, M A, C VALENCIA, M C SÁNCHEZ, J M FRANCO a C GALLEGOS. Influence of Soap Concentration and Oil Viscosity on the Rheology and Microstructure of Lubricating Greases. *Ind. And eng. Chem. Research*. 2006, roč. 45, č. 6, s. 1902-1910. ISSN 0888-5885.

- [22] NECAS, David, Petr SPERKA, Martin VRBKA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Film thickness mapping in lubricated contacts using fluorescence. *MM Science Journal*. 2015, roč. 2015, č. DECEMBER, s. 821–824. ISSN 18050476.
- [23] REZASOLTANI, Asghar a M M KHONSARI. lubricants On Monitoring Physical and Chemical Degradation and Life Estimation Models for Lubricating Greases. *Lubricants*. 2016, roč. 4, č. 3 s. 34. ISSN 2075-4442.
- [24] PALÁN, Miroslav. *Experimentální pozorování migrace plastického maziva v simulátoru valivého ložiska*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Košťál.
- [25] LICHTMAN, Jeff W. a José Angel CONCHELLO. Fluorescence microscopy. *Nature Methods* 2005 2:12. 2005, roč. 2, č. 12, s. 910–919. ISSN 1548-7105.
- [26] HAUGLAND R.P. Molecular probes: Handbook of fluorescent probes and research chemicals. *Biochemical Education*. 1996. ISSN 0307-4412.
- [27] CHROMA TECHNOLOGY CORPORATION. *AT - Aqua Longpass* / Chroma Technology Corp. [online]. 2020 [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://www.chroma.com/products/sets/19001-at-aqua-longpass>
- [28] CHROMA TECHNOLOGY CORPORATION. *ET - DAPI* / Chroma Technology Corp. [online]. 2020 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.chroma.com/products/sets/49000-et-dapi>
- [29] OPTIXS. *Dichroická zrcadla* | Optixs | OptiXs [online]. 2024 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/slovník-17/dichroicka-zrcadla-79s>
- [30] HIDROVO, Carlos H a Douglas P HART. Measurement Science and Technology Emission reabsorption laser induced fluorescence (ERLIF) film thickness measurement. *Meas. Sci. Technol.* 2001, roč. 12, s. 467–477. ISSN 0957-0233.
- [31] OPTIXS. *Neo 5.5* [online]. 2024 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/vedecke-kamery-30k/scmos-kamery-62k/neo-102p>
- [32] TUCSEN CHINA. *FL 20BW* [online]. 2022 [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.tucsen.com/fl-20-bw-product/>
- [33] NIKON INSTRUMENTS INC. *CFI Plan Fluor Series* [online]. 2024 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.microscope.healthcare.nikon.com/products/optics/cfi-plan-fluor-series>
- [34] THORLABS, Inc. *SOLIS-365C High-Power LED for Microscopy, 365 nm (UV), 3.0 W (Min)* [online]. 2024 [cit. 2023-10-30]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SOLIS-365C>

- [35] THORLABS, inc. *M415L4 415 nm, 1310 mW (Min) Mounted LED, 1500 mA* [online]. 2024 [cit. 2023-10-29]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=M415L4>
- [36] MISUMI. *Shim Rings / Standard from MISUMI* [online]. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: [https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110302399360/?rid=cat\\_&CategorySpec=](https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110302399360/?rid=cat_&CategorySpec=)
- [37] PROKOP, Adam. *Vliv opotřebení plastického maziva na jeho mazací vlastnosti*. Brno, 2023. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce David Košťál.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

snímek <sub>i</sub>	korigovaný snímek
hmko <sub>i</sub>	hmotnostní koeficient koncentrace složky
pafl <sub>i</sub>	koeficient parazitní fluorescence
pafl <sub>c</sub>	koeficient parazitní fluorescence barviva coumarin
pafl <sub>p</sub>	koeficient parazitní fluorescence barviva pyren
pafl <sub>m</sub>	koeficient parazitní fluorescence od autofluorescence maziva
sum <sub>in</sub>	suma intenzit od jednotlivých maziv
k <sub>in</sub>	koeficient intenzity světla
Li <sub>C</sub>	intenzita maziva obsahující pouze barvivo coumarin
Li <sub>P</sub>	intenzita maziva obsahující pouze barvivo pyren
Li <sub>m</sub>	intenzita maziva neobsahující barvivo
Li <sub>CP</sub>	intenzita maziva obsahující barvivo coumarin a pyren
i	index
n	počet zdrojů
mm	milimetrů
μm	mikrometr
nm	nanometrů
h	hodina
s	sekunda
ms	milisekunda
ns	nanosekunda
mm/s	milimetr za sekundu
RPM	Otáčky za minutu
N	Newton

°	stupeň
°C	stupeň Celsia
w/w	hmotnostní procento
hm.%	hmotnostní procento
%	procento
ND filtr	Neutral Density filtr
EHD	Elasto-hydrodinamické mazání
EHL	Elasto-hydrodinamické mazání
IF	impakt faktor
WOS	Web of science
PAO	Polyalfaolefinový olej
Li-1	mazivo obsahující PAO8 a lithiové mýdlo
Urea	mazivo obsahující PAO8 a močovinové zpevňovadlo
CP	obsah barviva coumarinu a pyrenu
C	obsah barviva coumarinu
P	obsah barviva pyren
$h\nu_{\text{ex}}$	energie excitačního fotonu
$h\nu_{\text{em}}$	energie emitačního fotonu
$S_0$	rovnovážná energetická poloha
$S_1'$	nabuzená energetická poloha
$S_1$	nabuzená energetická poloha po disipaci energie
L	základový olej
UL	mazivo na bázi močoviny
LL	mazivo na bázi lithiového komplexu
cSt	centiStokes

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 PRISMA diagram.....	14
Obr. 2-2 Tloušťka mazacího filmu jako funkce rychlosti pro vzorek oleje [10] .....	16
Obr. 2-3 Tloušťka mazacího filmu jako funkce rychlosti v závislosti na zatížení pro vzorek oleje [10] .....	16
Obr. 2-4 Fáze procesu mazání v ložisku [3].....	17
Obr. 2-5 Schéma formování filmu plastickými mazivy [12].....	17
Obr. 2-6 Mechanismus mazání pomocí částic zpevňovačů [13] – převzato a upraveno ..	18
Obr. 2-7 Graf tloušťky mazací vrstvy v závislosti na rychlosti [6] .....	19
Obr. 2-8 Mikrostruktura plastického maziva pro olej o kinematické viskozitě 334 cSt při různé koncentraci zpevňovačů: A) 8 hm.%, B) 14 hm.%, C) 20 hm.% [21]..	20
Obr. 2-9 Mikrostruktura plastického maziva pro zpevňovač o koncentraci 14 hm.% při různé kinematické viskozitě základového oleje: A) 11cSt, B) 334 cSt, C) 657 cSt [21]...	20
Obr. 2-10 Graf mazací vrstvy v závislosti na rychlosti pro maziva o různých viskozitách oleje [6] .....	21
Obr. 2-11 Fluorescenční princip [26].....	22
Obr. 2-12 Fluorescenční spektra pro barvivo pyren [19] (upraveno).....	23
Obr. 2-13 Fluorescenční intenzita po tloušťce filmu pro různé hmotnostní zastoupení barviva pyren [18].....	24
Obr. 2-14 Fluorescenční stabilita v čase u barviva pyren, vlevo bez UV stabilizace, vpravo s UV stabilizací [18].....	24
Obr. 2-15 Fluorescenční spektra pro barvivo coumarin [19] (upraveno) .....	25
Obr. 2-16 Reabsorpce emise schéma [30] .....	25
Obr. 2-17 Fluorescenční spektra pro coumarin a pyren [19] .....	26
Obr. 4-1 Schéma postupu práce .....	31
Obr. 4-2 Schéma měřící aparatury.....	32
Obr. 4-3 Propustnost filtru ET-DAPI-49000 [28].....	33
Obr. 4-4 Propustnost AT-Aqua-Longpass-19001 [27] .....	34
Obr. 4-5 Modul Sandwich.....	35
Obr. 4-6 Modul Ball-on-disk .....	35
Obr. 4-7 Struktura plastického maziva na bázi lithiového komplexu .....	37

Obr. 4-8 Snímek složky zpevňovadla před a po 15 h zpracování [23] .....	39
Obr. 4-9 Schéma flatfield korekce spolu s odečtením pozadí .....	40
Obr. 4-10 Schéma provedení konfigurace .....	44
Obr. 4-11 Testované pozice v kontaktu a jeho okolí.....	46
Obr. 4-12 Schéma postupu výpočtu maziva Li-1-CP.....	48
Obr. 4-13 Zúžené pole zájmu pro jednotlivé pozice .....	49
Obr. 5-1 Emisní vlnová délka pyrenu .....	52
Obr. 5-2 Emisní vlnová délka coumarinu.....	52
Obr. 5-3 Fluorescenční intenzita lithiového maziva při aparatuře pro coumarin, tloušťka filmu 0,05 mm .....	53
Obr. 5-4 Fluorescenční intenzita lithiového maziva při aparatuře pro pyren, tloušťka filmu 0,05 mm .....	54
Obr. 5-5 Fluorescenční intenzita lithiového maziva s podložkami při aparatuře pro coumarin .....	54
Obr. 5-6 Fluorescenční intenzita lithiového maziva s podložkami při aparatuře pro pyren .....	55
Obr. 5-7 Fluorescenční intenzita barviva pyren v lithném mazivu .....	55
Obr. 5-8 Získaný podíl složek na světelném zisku v mazivu Li-1-CP při tloušťce mazacího filmu 0,05 mm .....	56
Obr. 5-9 Získané světlo pouze pro dané barvivo pozorované jeho aparaturou u maziva Li-1-CP.....	58
Obr. 5-10 Vliv rychlosti na intenzitu světla.....	58
Obr. 5-11 Procentuální zastoupení složek ve statickém kontaktu Li-1-CP .....	59
Obr. 5-12 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 1.....	59
Obr. 5-13 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 1. ....	60
Obr. 5-14 Interferometrie maziva Li-1-CP .....	60
Obr. 5-15 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivu Li-1-CP, pozice 1. ....	61
Obr. 5-16 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 1. ....	61
Obr. 5-17 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 2.....	62
Obr. 5-18 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 2. ....	62
Obr. 5-19 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivu Li-1-CP, pozice 2. ....	63

Obr. 5-20 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 2. ....	63
Obr. 5-21 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 3. ....	64
Obr. 5-22 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 3. ....	64
Obr. 5-23 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivu Li-1-CP, pozice 3. ....	65
Obr. 5-24 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 3. ....	65
Obr. 5-25 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 4. ....	66
Obr. 5-26 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 4. ....	66
Obr. 5-27 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivu Li-1-CP, pozice 4. ....	67
Obr. 5-28 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 4. ....	67
Obr. 5-29 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro coumarin, pozice 5. ....	68
Obr. 5-30 Fluorescenční intenzita Li-1-CP pro pyren, pozice 5. ....	68
Obr. 5-31 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivu Li-1-CP, pozice 5. ....	69
Obr. 5-32 Zastoupení složky základového oleje v mazivu Li-1-CP, pozice 5. ....	69
Obr. 5-33 Grafické znázornění procentuálního zastoupení složek pro rychlost 25 a 500 mm/s .....	70
Obr. 5-34 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivech v pozici 1. ....	71
Obr. 5-35 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivech v pozici 2. ....	72
Obr. 5-36 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivech v pozici 3. ....	72
Obr. 5-37 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivech v pozici 4. ....	73
Obr. 5-38 Zastoupení složky zpevňovadla v mazivech v pozici 5. ....	73
Obr. 6-1 Tloušťka mazacího filmu maziv.....	78
Obr. 6-2 Mikrostruktury jednotlivých maziv .....	78
Obr. 6-3 Intenzita barviva coumarin na povrchu kuličky .....	80
Obr. 6-4 Pohyb částic zpevňovadla v kontaktu .....	81

## 12 SEZNAM TABULEK

tab. 4-1 Přehled nového označení používaných součástí .....	34
tab. 4-2 Hmotnostní poměr složek pro přípravu maziva.....	36
tab. 4-3 Označení jednotlivých vzorků maziv .....	37
tab. 4-4 Seznam použitých ND filtrů pro jednotlivá maziva pro parazitní fluorescenci....	42
tab. 5-1 Procentuální zastoupení světla v mazivu Li-1-CP při aparatuře pro coumarin ....	57
tab. 5-2 Procentuální zastoupení světla v mazivu Li-1-CP při aparatuře pro pyren.....	57

## 13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. – PARAZITNI\_ANALYZA (.m)

Příloha 2. – ZAKLADNI\_ANALYZA (.m)

Příloha 3. – DODATEK VÝSLEDKŮ Z KAPITOLY 5 (.pdf)