

**Gymnázium Přírodní škola, o.p.s.**  
**Profilová práce — třída Ný**  
**Vyšší stupeň studia**  
**2021/2022**

**Tomáš Kudláček**

**Optimalizace a charakterizace barevně  
hořících plastických pyrotechnických  
složí na bázi polypropylenglykolu  
a polyethylenoxidu**

**Vedoucí práce: RNDr. Marek Matura, Ph.D.**

**Datum odevzdání: 21. ledna 2022**



Gymnázium Přírodní škola, o. p. s.

Optimalizace a charakterizace barevně  
hořících plastických pyrotechnických složí na  
bázi polypropylenglykolu a polyethylenoxidu

Tomáš Kudláček

Vedoucí práce: RNDr. Marek Matura, Ph.D.

Odborní konzultanti: Ing. Ondřej Vodochodský, Ph.D.  
doc. Ing. Robert Matyáš, Ph.D.  
doc. Ing. Zdeněk Jalový, Ph.D.

Praha  
leden 2022



## **ABSTRAKT**

Předložená práce se zabývá barevně hořícími složemi s konzistencí plastické hmoty, jejichž autorem je Mgr. Radovan Skácel, Ph.D. Slože byly připravovány z polypropylenglykolu (palivo, pojivo), polyethylenoxidu (palivo), chloristanu amonného (oxidovadlo) a dusičnanu strontnatého, dusičnanu barnatého, nebo bazického dusičnanu měďnatého (oxidovadlo a složka barvicí plamen pro příslušnou barvu plamene). Cílem práce bylo u daných složí charakterizovat jejich chemickou stabilitu (pomocí infračervené spektroskopie) v řádu týdnů a určit jejich citlivost ke tření. Dále byla cílem úprava poměrů výchozích látek pro dosažení optimální konzistence a jednoznačné čisté barvy plamene.

Z 18 testovaných složí (4 pro červenou, 7 pro zelenou a 7 pro modrou barvu plamene) byly vybrány následující slože s nejvhodnějšími vlastnostmi (tj. minimální adheze, plasticita, soudržnost, jednoznačná a čistá barva plamene). Pro červenou barvu plamene to byla slož tvořená 14 % polypropylenglykolu, 43 % dusičnanu strontnatého a 43 % chloristanu amonného, jejíž citlivost ke tření pro 50% pravděpodobnost iniciace byla stanovena na 189 N. Optimální složení slože pro zelený plamen bylo 14 % polypropylenglykolu, 46 % dusičnanu barnatého a 40 % chloristanu amonného, přičemž třením byla v 50 % případů iniciována silou 145 N. Modře hořící slož s optimálními vlastnostmi obsahovala 17 % polypropylenglykolu, 33 % bazického dusičnanu měďnatého a 50 % chloristanu amonného a třecí síla pro 50% pravděpodobnost iniciace byla stanovena na 87 N. Zmíněné slože jsou při skladování v uzavřené nádobě za běžných laboratorních podmínek stabilní minimálně po dobu 5 týdnů.

**Klíčová slova:** barevně hořící slože, plastické slože, polypropylenglykol, polyethylenoxid, optimalizace složení, citlivost ke tření, chemická stabilita, infračervená spektroskopie, červený plamen, zelený plamen, modrý plamen



## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Mgr. Radovanu Skácelovi, Ph.D. za svolení věnovat se v mé ročníkové práci složím, kterých je autorem. Dále děkuji Ústavu energetických materiálů FChT Univerzity Pardubice za zprostředkování tématu a možnost realizace práce v laboratořích ÚEnM. Poděkování také rozhodně patří Ing. Ondřeji Vodochodskému, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při měření. V neposlední řadě děkuji odborným konzultantům – doc. Ing. Robertu Matyášovi, Ph.D., doc. Ing. Zdeňku Jalovému, Ph.D.; vedoucímu práce RNDr. Marku Maturovi, Ph.D., Ing. Milanu Jančíkovi za pomoc při fotografování složí a Ing. Janu Ryšavému za cenné připomínky a rady.



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÝ ÚVOD .....</b>	<b>2</b>
2.1	Pyrotechnická slož.....	2
2.2	Barevně hořící pyrotechnické slože.....	2
2.3	Složení barevně hořících pyrotechnických složí.....	3
2.3.1	Okysličovačla .....	3
2.3.2	Paliva.....	4
2.3.3	Pojiva.....	4
2.3.4	Složka barvicí plamen .....	4
2.3.5	Zesilovače barev .....	5
2.4	Charakterizace pyrotechnických složí .....	5
2.4.1	Stanovení chemické stability IR spektroskopí.....	5
2.4.2	Stanovení citlivosti ke tření .....	7
2.4.3	Stanovení barevnosti a čistoty plamene .....	7
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>9</b>
3.1	Použité chemikálie, přístroje a metody.....	9
3.2	Bezpečnostní upozornění pro přípravu a manipulaci s pyrotechnickými složemi.....	9
3.3	Příprava složí.....	10
3.4	Posuzování konzistence .....	11
3.5	Posuzování optimální barvy plamene.....	11
3.6	Výběr perspektivních složí.....	13
3.7	Stanovení chemické stability.....	14
3.8	Stanovení citlivosti ke tření.....	15
<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>18</b>
4.1	Konzistence, adheze, čistota barvy plamene a průběh hoření.....	18
4.1.1	Červeně hořící slože.....	18
4.1.2	Zeleně hořící slože .....	20
4.1.3	Modře hořící slože .....	22
4.2	Chemická stabilita .....	24
4.2.1	Porovnání chemické stability složí se vzorkem z roku 2019 .....	28
4.2.2	Chemická stabilita červeně a zeleně hořících složí při ponechání na vzduchu .....	29
4.3	Citlivost ke tření .....	31
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>37</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 2.1</b>	Chromatický diagram CIE XYZ (resp. CIE 1931). .....	8
<b>Obr. 3.1</b>	Vzorek modré slože slisovaný do válečku se zasunutou stopinou pro zapálení a vzorek červené/zelené slože slisovaný do válečku s důlkem svrchu. ....	12
<b>Obr. 3.2</b>	Standardní uspořádání fotoaparátu a zapalovaných složí použité k pořizování záznamu z hoření připravených složí. ....	13
<b>Obr. 3.3</b>	Infračervený spektrometr Nicolet iS50 FT-IR.....	14
<b>Obr. 3.4</b>	Třecí zařízení BAM Friction Apparatus FSA-12.....	15
<b>Obr. 3.5</b>	Schéma třecího přístroje a výchozí polohy vzorku mezi válečkem a destičkou.....	16
<b>Obr. 3.6</b>	Snímek obrazovky z programu FEST. ....	17
<b>Obr. 4.1</b>	Porovnání hoření a barvy složí 1Č a 3Č. ....	19
<b>Obr. 4.2</b>	Porovnání hoření a barvy složí 1Z a 3Z. ....	21
<b>Obr. 4.3</b>	Porovnání hoření a barvy složí 1M a 3M. ....	23
<b>Obr. 4.4</b>	Infračervené spektrum červené slože 1 (1Č) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	25
<b>Obr. 4.5</b>	Infračervené spektrum zelené slože 1 (1Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	25
<b>Obr. 4.6</b>	Infračervené spektrum modré slože 1 (1M) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	25
<b>Obr. 4.7</b>	Infračervené spektrum červené slože 4 (4Č) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	26
<b>Obr. 4.8</b>	Infračervené spektrum zelené slože 7 (7Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	26
<b>Obr. 4.9</b>	Infračervené spektrum modré slože 7 (7M) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	26
<b>Obr. 4.10</b>	Infračervené spektrum červené slože 3 (3Č) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	27
<b>Obr. 4.11</b>	Infračervené spektrum zelené slože 3 (3Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	27
<b>Obr. 4.12</b>	Infračervené spektrum modré slože 3 (3M) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	27
<b>Obr. 4.13</b>	Infračervené spektrum červené slože 1 (1Č) připravené v roce 2019 (nahore), bezprostředně po jejím namíchání (uprostřed) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	28
<b>Obr. 4.14</b>	Infračervené spektrum zelené slože 1 (1Z) připravené v roce 2019 (nahore), bezprostředně po jejím namíchání (uprostřed) a 5 týdnů po namíchání (dole). ....	28
<b>Obr. 4.15</b>	Infračervené spektrum červené slože 1 (1Č) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 2 týdny po namíchání při ponechání na vzduchu (dole). ....	29
<b>Obr. 4.16</b>	Infračervené spektrum červené slože 3 (3Č) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 2 týdny po namíchání při ponechání na vzduchu (dole). ....	29
<b>Obr. 4.17</b>	Infračervené spektrum zelené slože 1 (1Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 2 týdny po namíchání při ponechání na vzduchu (dole). ....	30
<b>Obr. 4.18</b>	Infračervené spektrum zelené slože 3 (3Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 2 týdny po namíchání při ponechání na vzduchu (dole). ....	30
<b>Obr. 4.19</b>	Znečištěná část vzorku slože pro červenou barvu plamene a vzorku pro zelenou barvu plamene ponechaných na vzduchu.30	

<b>Obr. 4.20</b>	Porovnání citlivosti ke tření vybraných červeně (1Č, 3Č, 4Č), zeleně (1Z, 3Z, 7Z) a modře (1M, 3M, 7M) hořících složí. ....	32
<b>Obr. 4.21</b>	Porovnání stop na destičce po zkouškách citlivosti vůči tření červeně/zeleně hořících složí a modře hořících složí. ....	33
<b>Obr. 4.22</b>	Citlivostní křivky vybraných červeně hořících složí (1Č; 3Č; 4Č). ....	33
<b>Obr. 4.23</b>	Citlivostní křivky vybraných zeleně hořících složí (1Z; 3Z; 7Z). ....	34
<b>Obr. 4.24</b>	Citlivostní křivky vybraných modře hořících složí (1M; 3M; 7M). ....	34

## SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 3.1</b>	Tabulka shrnující procentuální poměry látek pro přípravu červeně hořících složí.....	10
<b>Tab. 3.2</b>	Tabulka shrnující procentuální poměry látek pro přípravu zeleně hořících složí.....	10
<b>Tab. 3.3</b>	Tabulka shrnující procentuální poměry látek pro přípravu modře hořících složí.....	11
<b>Tab. 4.1</b>	Citlivost ke tření [N] pro 50% pravděpodobnost iniciace u složí 1Č, 3Č, 4Č, 1Z, 3Z, 7Z, 1M, 3M a 7M.....	31

## **PŘÍLOHY**

K práci jsou přiloženy texty, které nejsou součástí závěrečné zprávy. Tyto texty jsou výstupem z práce nebo jeho součástí, nebo dokumentují průběh práce:

**Příloha I** Písemný záměr předložené práce

**Příloha II** Původní návod pro přípravu barevně hořících složí na bázi polypropylenglykolu a polyethylenoxidu

**Příloha III** Protokoly ke stanovení citlivosti vůči tření

**Příloha IV** Návod na přípravu složí s optimálními vlastnostmi vzniklý v rámci této práce

V textu je na ně odkázáno jako *Příloha* s příslušným římským číslem *I-IV*.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PPG	Polypropylenglykol
PEO	Polyethylenoxid
IR	Infračervený (angl. Infrared)
FTIR	Infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (angl. Fourier Transform Infrared)
ATR	Technika zeslabeného úplného odrazu (angl. Attenuated Total Reflectance)
MW	Molekulová hmotnost (angl. Molecular Weight)
FEST	Fast and Efficient Sensitivity Testing
$F_t$	Třecí síla [N]
$P_i$	Pravděpodobnost iniciace [%]
1Č, 2Č atd.	Pracovní označení složí, které byly připraveny v rámci práce. Číslo udává, v jakém pořadí byly slože připraveny. Písmeno označuje barvu plamene slože (Č = červený plamen, Z = zelený plamen, M = modrý plamen). Např. 5Z je zeleně hořící slož, která byla pro tuto barvu plamene připravena jako pátá. Slože označené číslem 1 jsou slože připravené dle původních poměrů látek od Mgr. Radovana Skácela, Ph.D.

# 1 ÚVOD

Pyrotechnika je lidstvu známá už od dob antického Řecka. V té době měla především velký význam při válčení. Pyrotechnické slože jsou ve vojenství důležité dodnes. Kromě vojenské pyrotechniky je od doby starověké Číny hojně využívána zábavní pyrotechnika, která je v mnoha zemích nezbytnou součástí tradičních slavností. U zábavní pyrotechniky jde především o světelný, dýmový nebo zvukový efekt. Na tom lze dobře demonstrovat vlastnosti různých chemických látek.

Barevně hořící pyrotechnické slože by tak mohly najít uplatnění ve výuce chemie, a to především díky názornosti barvení plamene kationty různých kovů a ztraktivnění frontální výuky.

Pyrotechnické slože však nepatří mezi nejbezpečnější chemické směsi, a proto by jejich uplatnění ve výuce na středních školách a druhých stupních ZŠ mohlo být problematické. Předložená práce se proto zabývá optimalizací a charakterizací složí, které již byly v rámci laboratorních cvičení použity. Jedná se o barevně hořící plastické pyrotechnické slože na bázi polypropylenglykolu a polyethylenoxidu, jejichž autorem je Mgr. Radovan Skácel, Ph.D. (Výzkumný ústav průmyslové chemie, Explosia a.s.).

Cílem práce je na základě opakovaných pokusů a pozorování optimalizovat složení daných pyrotechnických složí. Slož s takto optimalizovaným složením by měla:

- a. při hoření poskytovat co nejjednoznačnější a nejčistší barvu plamene,
- b. mít takovou konzistenci, která bude plastická s dobrou soudržností, malou adhezí k laboratorním pomůckám a ochranným rukavicím a plasticitou umožňující snadnou dělitelnost a tvarovatelnost rukou,
- c. mít co nejnižší citlivost ke tření a být za běžných laboratorních podmínek chemicky stabilní v řádu týdnů.

Výsledkem práce by měly být optimalizované poměry látek, které budou naplňovat výše uvedené body. Optimalizace složení je prováděna mj. za účelem posouzení možnosti použití složí ve výuce chemie (za předpokladu dodržení všeobecně platných zásad bezpečné práce při laboratorním praktiku), přičemž jako jedno z hodnotících kritérií naplnění tohoto cíle je stabilita a citlivost ke tření. Dále si práce klade za cíl charakterizovat vlastnosti jak optimalizovaných složí, tak složí s původními poměry látek, ze kterých práce vychází.

## 2 TEORETICKÝ ÚVOD

### 2.1 Pyrotechnická slož

Pyrotechnická slož je v základu směsí hořlavin a okysličovadel, které po iniciaci exotermicky reagují [1]. Použitím přídatných látek můžeme ovlivnit další vlastnosti slože během jejího hoření (příp. výbuchu), které může být podle přidané látky doprovázeno světelnými, tepelnými, zvukovými, dýmovými, tlakovými nebo pohybovými účinky [1–3].

Těchto efektů lze využít ve vojenské technice, v národním hospodářství (průmysl, doprava, zemědělství, filmové efekty) nebo k přípravě zábavních ohňů (ohňostroje, oslavné střelby) [3].

### 2.2 Barevně hořící pyrotechnické slože

Některé druhy pyrotechniky jsou uzpůsobeny tak, aby měl jejich plamen při hoření určitou barvu. Toho se využívá např. ve vojenské signalizaci, civilních záchranných světlicích nebo v zábavní pyrotechnice [4].

Na barevně hořící pyrotechniku bývá kladeno několik zvláštních požadavků – především co se týče barvy plamene, hoření slože a množství uvolněného světla [3]:

- a. Při hoření slože musí být plamen dostatečně charakteristicky zbarven, aby nedošlo k záměně barev. Čistota barvy plamene (viz níže) by neměla být menší než 70-75 %, obzvláště v signálních světlicích.
- b. Při hoření musí být množství uvolňované světelné energie co největší. Rychlost hoření slože by měla být řádově v jednotkách mm/s.
- c. Pro zřetelné pozorování by svítivost složi měla být minimálně v řádech několika tisíců kandela<sup>1</sup>.

Důraz na tyto požadavky je kladen především ve vojenských a civilních signálních světlicích. U těch je potřeba, aby byla barva plamene jednoznačná a všemi pozorovateli (kteří nejsou barvoslepí) pojmenována jako reprezentovaná barva. [4]

---

<sup>1</sup> Šidlovskij [3] uvádí minimální svítivost signálních světlic jako několik tisíc svíček. Svítivost jedné svíčky lze v jednotkách SI vyjádřit jako 1 cd.

U těchto signálních světel by barva neměla ztrácet na kvalitě a měla by být jasně rozpoznatelná i při pozorování z velké vzdálenosti, za denního světla nebo při pozorování přes mlžný opar apod [4].

V zábavní pyrotechnice a ohňostrojích nemusí být světlo plamene tak intenzivní. Ani barevnost plamene není omezená na definovatelné barvy. Je tak možné v zábavní pyrotechnice využít nádechy barev jako růžovou, karmínovou nebo levandulovou, které by v signální pyrotechnice nemohly být vhodné pro reprezentaci červené barvy [4].

## **2.3 Složení barevně hořících pyrotechnických složí**

### **2.3.1 Okysličovadla**

Označují se také jako *oxidovadla*. Spolu s hořlavinou (palivem; viz níže) tvoří základ každé pyrotechnické slože. Jako okysličovadla jsou využívány kyslíkaté látky, mohou ale být využity i zdroje oxidační složky neobsahující kyslík (např. hexachlorethan nebo  $PbF_3$ ) [3]. Okysličovadla se do pyrotechnických složí přidávají jako zdroj oxidační složky a pro zvýšení rychlosti hoření. Pokud by slož hořela pouze díky vzdušnému kyslíku, hořela by pomaleji [3].

Sloučenina, která má být použita jako okysličovadlo, musí být v pevném skupenství a její bod tání musí být min. 50-60 °C [3]. Kromě toho musí z podstaty věci obsahovat co nejvíce kyslíku, který pak musí snadno uvolňovat při hoření slože. Zvolená látka nesmí být hygroskopická, musí být chemicky stabilní v teplotním rozpětí až do 100 °C a nemá působit toxicky na lidský organismus ani produkovat toxické látky během reakce [3, 5].

S ohledem na využití v barevně hořících složích by kationty ze sloučeniny okysličovadla neměly mít vliv na výslednou barvu plamene (pokud tedy neprodukují požadovanou barvu) [5].

Okysličující sloučenina také musí mít přijatelné teplo rozkladu. Pokud by bylo příliš exotermní, byla by výsledná slož explosivní a vysoce citlivá. Naopak nesmí být příliš endotermní – to by způsobilo problémy při zapalování a špatně by podporovalo hoření [5].

### 2.3.2 Paliva

Jak již bylo zmíněno, palivo spolu s oxidovadlem tvoří základ pyrotechnické složky. Hlavní funkcí paliva je poskytnutí energie při hoření složky. Palivem může být látka, která v pyrotechnické složce nemá jinou vedlejší funkci. Některé hořlaviny ale mohou zároveň plnit úlohu pojidel (viz níže) nebo dýmotvorných látek [3].

### 2.3.3 Pojiva

Používají se pro zhuštění pyrotechnických složek. V případě použití organických pojidel plní tyto látky zároveň funkci paliv (hořlavin). Použití organických sloučenin zároveň snižuje rychlost hoření a zvyšuje chemickou stálost složek [3]. Kromě toho organické látky ve složce při hoření zabarvují plamen do oranžova [5].

### 2.3.4 Složka barvicí plamen

Produkce barevného světla lze dosáhnout použitím některých prvků a sloučenin, které jsou při zahřátí na vysokou teplotu schopné emitovat úzké pásmo záření ve viditelné části (380–780 nm) elektromagnetického spektra. Toto záření je pozorovatelem vnímáno jako barva. K produkci barevného světla je zapotřebí teplo (ve složkách získané z reakce mezi oxidovadlem a palivem) a sloučeniny barvicí plamen [5].

Obvykle jsou pro barvení použity soli kovů, výjimečně pak přímo kovové prášky (např. měděný prach pro modrý plamen). Díky teplu při hoření složky tyto soli uvolňují atomy daného kovu<sup>2</sup> (kationty) – vzniknou tak emitory. Ty jsou v plamenu excitovány na vyšší energetickou hladinu, přičemž dochází následně k emisi záření o příslušné barvě [6].

Pro barvení plamene mohou být použity uhličitany, chloridy, chlorečnany nebo dusičnany s kovem pro příslušnou barvu (např. stroncium pro červenou, měď pro modrou, baryum pro zelenou atd.). Tyto sloučeniny pak kromě barvy ovlivňují i jiné vlastnosti složky. Např. nekovový iont (aniont) ze soli může ovlivnit teplotu plamene a v závislosti na tom pak jas produkovaného světla. Nemá však zpravidla vliv na barvu [6].

Složka barvicí plamen také může plnit funkci oxidovadla nebo ovlivňovat stabilitu a citlivost složky vůči mechanickým podnětům. Konkrétně dusičnany na rozdíl

---

<sup>2</sup> Z daných kovů každý emituje záření o jiné barvě, čehož se mj. využívá při plamenové zkoušce v analytické chemii.

od chloridů poskytují složi při hoření kyslík a snižují citlivost slože – tedy např. riziko nechtěné iniciace slože [3], [6].

### 2.3.5 Zesilovače barev

Sloučeniny, které mají plamenu dodat barvu, by měly být snadno těkavé. Do barevně hořících složí mohou být přidány látky, které zlepšují zbarvení plamene. Většinou se jedná o organické sloučeniny chloru [3].

## 2.4 Charakterizace pyrotechnických složí

U pyrotechnických složí lze sledovat celou řadu vlastností a parametrů. Ty je možné měřeními konkrétně stanovit a na základě toho dané slože charakterizovat. Níže je výčet několika způsobů charakterizace vlastností pyrotechnických složí, které byly uplatněny v této práci.

### 2.4.1 Stanovení chemické stability IR spektroskopii

Infračervená spektroskopie dokáže jednoznačně identifikovat čisté organické i anorganické sloučeniny (s výjimkou několika homonukleárních molekul). Jejím principem je absorpce IR záření při průchodu vzorkem. Po absorbování určité energie (v IR spektroskopii vyjádřené vlnočtem  $[\text{cm}^{-1}]^3$ ) z infračerveného záření dochází ke změně vibračních a rotačních stavů v molekule. Funkční skupiny nebo vazby vykonávají vibrace především valenční – tedy kmity, při kterých dochází ke změně délky vazeb (zkracování a prodlužování); nebo deformační – tam dochází ke změně vazebných úhlů. Změna dipólového momentu molekuly při vibraci se projeví v infračerveném spektru [7].

Spektra jsou závislost míry absorpce energie (absorbance nebo transmittance [%]) na vlnové délce dopadajícího záření (vyjádřené vlnočtem  $[\text{cm}^{-1}]$ ). Spektra tvoří úzké, blízko sebe ležící absorpční pásy, které odpovídají přechodům mezi jednotlivými vibračními hladinami. Přechody mezi rotačními hladinami tak může vzniknout řada pásů v rámci jedné vibrační hladiny. Každá sloučenina pak má (až na několik výjimek) unikátní infračervené absorpční spektrum znázorněné právě těmito pásy<sup>4</sup> [7, 8].

<sup>3</sup> V angličtině se pro vlnočty používají termíny *wavenumber* nebo *infrared frequency*.

<sup>4</sup> Někdy se též používá výraz *peak* (resp. počestěně *pk*).

Infračervenou spektroskopii lze proto uplatnit při sledování chemické stability chemických směsí – tedy i pyrotechnických složí. Každá slož má specifické spektrum, ve kterém jsou pásy jednotlivých komponent, ze kterých byla slož připravena.

Při sledování slož v čase tak lze u opakovaných měření infračervenou spektroskopii pozorovat vývoj spektra. Pokud se bude spektrum měnit ve smyslu počtu a tvaru peaků, lze to interpretovat tak, že slož není chemicky stabilní – rozbíjí/přeměňuje se na jiné látky než byly ty výchozí (tím pádem jim přísluší jiné vibrační pásy). Jestliže budou porovnávaná spektra shodná co se týče tvaru a počtu peaků, lze slož považovat za chemicky stabilní. Zde je důležitá citlivost metody. Případné malé změny nemusí být zachyceny ve spektru. Aby se změna projevila ve spektru, musí nastat tam, kde není jiný pás nebo alespoň tam, kde není zcela překrytá jiným pásem.

Pro měření infračervených spekter lze použít přístroje ze tří základních skupin. V současnosti jsou nejrozšířenější infračervené spektrometry s Fourierovou transformací (FTIR). Ty poskytují vysokou citlivost, rozlišení a rychlost sběru dat [7].

FTIR spektrometry nemají disperzní prvek a zaznamenávají tak všechny vlnové délky z infračerveného spektra současně. Toho je docíleno použitím Michelsonova interferometru. Ten odděluje vlnové délky modulací signálu ze zdroje. Signál pak vede vzorkem tak, aby mohl být zaznamenán jako interferogram (≠klasický spektrální záznam). Kromě interferogramu vzorku je měřen i referenční interferogram pozadí infračerveného spektra. Oba interferogramy se poté zpracují Fourierovou transformací, což je matematická operace převádějící zaznamenané interferogramy na spektra. Během této operace je amplituda výstupního signálu závislého na čase převedena na veličinu závislou na frekvenci (zmíněná transmitance nebo absorbance). Na závěr je vypočten poměr získaných dvou spekter. To poskytne výsledné spektrum [7].

Ve FTIR spektroskopii bývá (vzhledem k uživatelské přívětivosti) dominantní metodou měření technika zeslabeného úplného odrazu (ATR). Její použití je obzvláště výhodné v případě měření vzorků, které silně absorbují infračervené záření. Principem ATR je násobný úplný odraz záření na fázovém rozhraní měřeného vzorku a měřícího krystalu. Svazek paprsků ze zdroje infračerveného záření ve spektroskopu je přiveden do krystalu soustavou zrcadel. Úhel dopadu na fázové rozhraní přitom musí vyhovět podmínce totálního odrazu. Měřený vzorek je v dokonalém kontaktu s ATR krystalem díky přitlačení shora. Záření proniká částečně do analyzovaného materiálu. Pokud

měřený vzorek absorbuje záření o určité frekvenci, pak tato složka bude v totálně odraženém světle zeslabena [9].

### 2.4.2 Stanovení citlivosti ke tření

Podstata zkoušky spočívá v namáhání složky třením mezi staticky zatíženým porcelánovým kolíkem a pohyblivou porcelánovou destičkou. Zkouška se provádí podle postupu uvedeného ve Vyhlášce č. 222/2004 Sb., kterou se u chemických látek a chemických přípravků stanoví základní metody pro zkoušení fyzikálně-chemických vlastností, výbušných vlastností a vlastností nebezpečných pro životní prostředí (resp. jejich přílohách) [10].

Dle této vyhlášky se citlivostí složky ke tření rozumí nejmenší velikost třecí síly vyjádřená zatížením třecího kolíku, při které dochází k iniciaci, popř. k částečnému rozkladu výbušniny, vnímanému zrakem, čichem nebo sluchem. Podle zmíněné vyhlášky je účelem zkoušky stanovit dolní a horní mez citlivosti ověřované výbušniny ke tření. Dolní mez citlivosti je nejmenší zatížení třecího kolíku [N], při kterém nastává první roznět. Horní mez citlivosti je nejmenší zatížení třecího kolíku [N], při kterém dojde k roznětu při každém pokusu [10].

Další metodou pro vyjádření citlivosti ke tření je zjištění hladiny (třecí síly [N]) s 50% pravděpodobností iniciace, popř. stanovení celé citlivostní křivky. Citlivost ke tření vyjádřená hodnotou pro 50% pravděpodobnost iniciace slouží k porovnání s citlivostí různých látek a směsí a jejich vnesení do kontextu [11].

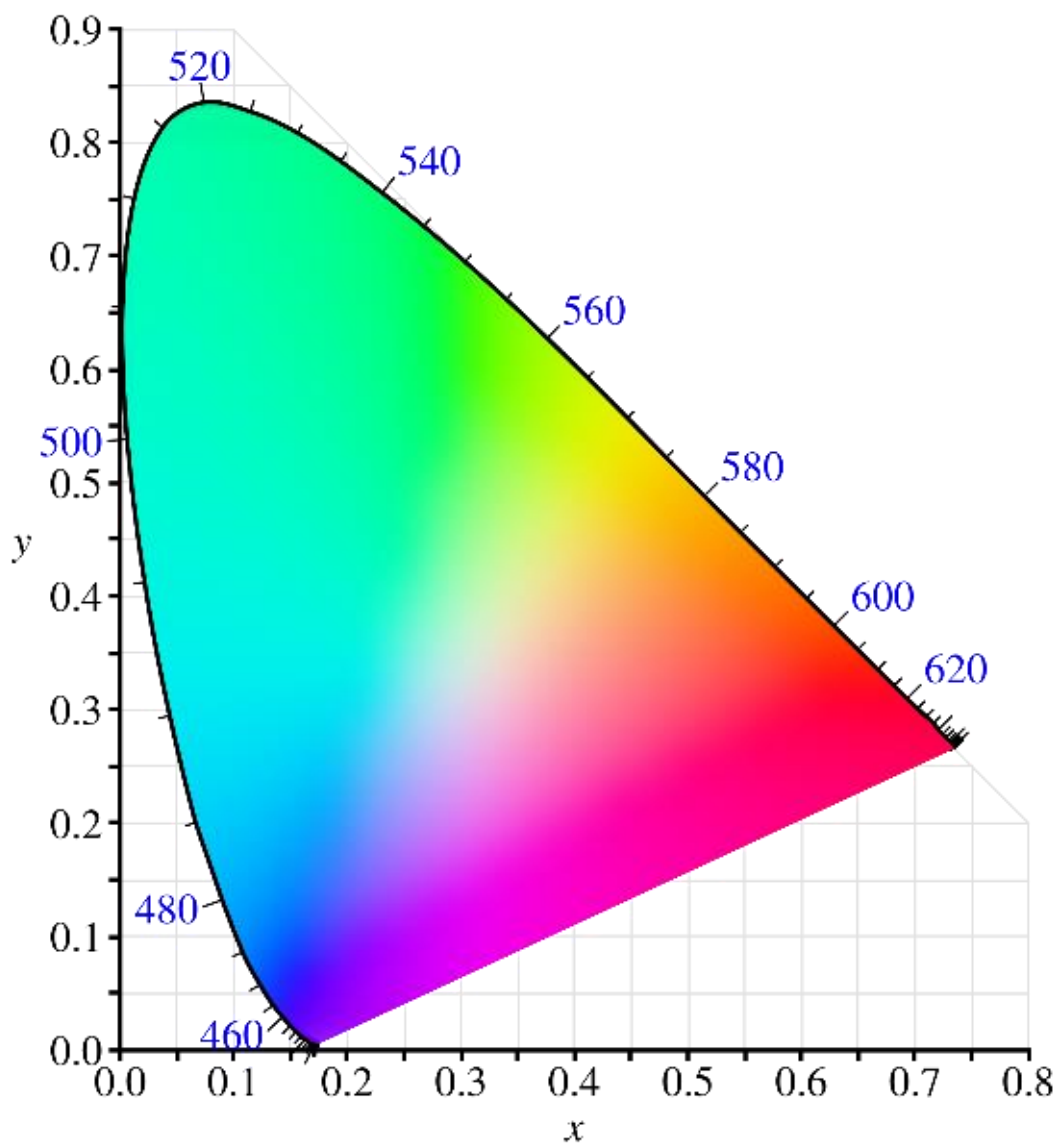
### 2.4.3 Stanovení barevnosti a čistoty plamene

U barevně hořících pyrotechnických složí lze stanovit *barevnost plamene*. Ta se stanoví na základě *barevného tónu* a *čistoty barvy* plamene [3]. Rozdíly v barevnosti plamene, které jsou označeny použitím termínů *červený*, *modrý*, *zelený* atd. rozumíme rozdíly v barvě [3]. Barva je definována koeficienty  $x$ ,  $y$  a  $z$  v barevném prostoru CIE XYZ (resp. CIE 1931) (viz Obr. 2.1).

Koeficienty  $x$ ,  $y$  a  $z$  reprezentují základní barvy, tedy červenou ( $x$ ), zelenou ( $y$ ) a modrou ( $z$ ). Přes zmíněný diagram se tyto koeficienty převedou na odpovídající barevný tón.

Barevným tónem je reprezentována vlnová délka monochromatického záření, kterou je nutné smísit s bílým zářením, aby bylo dosaženo konkrétní barvy. Poměr, v jakém je v dané barvě smísen barevný tón s bílým zářením, vyjadřuje čistota

barvy [%]. Čistota barvy udává procentuální podíl barevného tónu ve výsledném světelném toku [3].



**Obr. 2.1** Chromatický diagram CIE XYZ (resp. CIE 1931). (Převzato z wikipedia.org)

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Použité chemikálie, přístroje a metody

Slože, kterými se tato práce zabývala, byly připravovány z následujících látek:

- a)  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  – dusičnan strontnatý, čistý (LACHEMA/CHEMAPOL),
- b)  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  – dusičnan barnatý, p.a. (LACHEMA/CHEMAPOL),
- c)  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  – bazický dusičnan měďnatý, (mimo originální balení),
- d)  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  – chloristan amonný, frakce  $< 400 \mu\text{m}$ , (mimo originální balení),
- e) PPE – polyethylenoxid, MW = 8 000 000, prášek (Aldrich),
- f) PPG – polypropylenglykol, MW = 4000, tekutý (Alfa Aesar).

Dusičnany a chloristan amonný v daných složích plnily funkci oxidovadel. Kovy vázané k dusičnanům byly složky barvicí plamen (*Sr* pro červenou, *Ba* pro zelenou a *Cu* pro modrou barvu plamene). Uvedené polymery sloužily jako paliva, polypropylenglykol zároveň jako pojivo.

Oxidovadla byla před použitím rozetřena v třecí misce a proseta sítím. Pro přípravu složí byly použity pouze frakce menší než  $100 \mu\text{m}$ . Chloristan amonný byl před použitím sušen v sušičce na  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  – tam se během práce i skladoval, aby neabsorboval vzdušnou vlhkost.

Pro odvážení potřebného množství látek byly použity váhy KERN EW3000-2M ( $e = 0,1 \text{ g}$ ;  $d = 0,01 \text{ g}$ ) a Sartorius LP620S ( $d = 0,001 \text{ g}$ ).

### 3.2 Bezpečnostní upozornění pro přípravu a manipulaci s pyrotechnickými složemi

Pyrotechnické slože jsou obecně reaktivní systémy citlivé k vnějším podnětům. Při přípravě, manipulaci a zacházení s pyrotechnickými složemi je třeba dodržovat veškeré zásady bezpečnosti práce s energetickými materiály. Mezi tyto zásady patří zejména (nikoliv výlučně):

- a. používání ochranných pomůcek (brýlí, štítu, popř. jiné ochrany očí a obličeje, ochrany sluchu, ochranných rukavic),
- b. s pyrotechnickými složemi je třeba zacházet obezřetně, vyvarovat se vystavování slože rizikovým podnětům, jako především plamenu, tření, nárazu nebo výboji elektrostatické jiskry (např.

vyhnout se tření slož mezi tvrdými materiály, nenosit oblečení, které kumuluje statický náboj).

Pro bezpečnou přípravu slož je nutné výchozí látky, které mají být rozetřeny v misce, rozetřít samostatně, nikoliv celou směs dohromady. Následné mísení látek v třecí misce musí být provedeno dřevěnou špachtlí. Při přípravě slož musí být dodržen postup uvedený níže.

### 3.3 Příprava slož

Slože byly připraveny z chemikálií uvedených v seznamu výše podle následujícího postupu: Do třecí misky byl odvážen předsušený chloristan amonný. K němu byl přidán dusičnan strontnatý, nebo dusičnan barnatý, nebo bazický dusičnan měďnatý (podle požadované barvy plamene). Obě látky byly promíchány dřevěnou špachtlí. Poté byl do misky přidán polyethylenoxid (pokud ho měla daná slož obsahovat). Jako poslední složka směsi byl přidáván polypropylenglykol, který byl (kvůli své viskozitě<sup>5</sup>) dávkován injekční stříkačkou. Celá směs byla následně opatrně promíchávána dřevěnou špachtlí v třecí misce, dokud nebyla zhomogenizována.

Každá slož byla připravena v množství 10 g podle poměrů látek [%], které shrnují tabulky níže:

**Tab. 3.1** Tabulka shrnující procentuální poměry látek pro přípravu červeně hořících slož.

látka	1Č	2Č	3Č	4Č
PPG	12,00	16,98	21,43	14,00
PEO	2,00	1,89	1,79	–
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	43,00	40,57	38,39	43,00
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	43,00	40,57	38,39	43,00

**Tab. 3.2** Tabulka shrnující procentuální poměry látek pro přípravu zeleně hořících slož.

látka	1Z	2Z	3Z	4Z	5Z	6Z	7Z
PPG	12,00	16,98	21,43	17,14	16,98	16,98	14,00
PEO	2,00	1,89	1,79	0,95	–	–	–
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	46,00	43,40	41,07	43,81	43,40	45,28	46,00
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	40,00	37,74	35,71	38,10	37,74	37,74	40,00

<sup>5</sup> Viskozita daného pojiva zároveň neumožňovala přesné dávkování v řádech setin a tisícín gramu.

**Tab. 3.3** Tabulka shrnující procentuální poměry látek pro přípravu modře hořících složí.

látka	1M	2M	3M	4M	5M	6M	7M
PPG	12,00	12,00	21,43	14,00	12,00	14,00	17,00
PEO	2,00	–	1,79	–	2,00	–	–
Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	36,00	58,00	32,14	46,00	52,60	36,00	33,00
NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	50,00	30,00	44,64	40,00	33,40	50,00	50,00

### 3.4 Posuzování konzistence

Konzistence připravených složí byla posuzována subjektivně. Při posuzování konzistence byl brán ohled především na:

- drolivost připravených 10 g slože a soudržnost v jednom celku,
- možnost dělení dřevěnou špachtlí,
- možnost formování rukou,
- adhezi vůči latexovým rukavicím, kovové špachtli a třecí misce.

Výše uvedené vlastnosti byly posuzovány bezprostředně po přípravě a poté nepravidelně v několikátýdenních odstupech od přípravy, přičemž slože byly uchovávány v těsně uzavřené plastové nádobě. Z posuzování konzistencí byly vedeny záznamy do laboratorního deníku.

Konzistence byla posuzována u všech připravených složí.

### 3.5 Posuzování optimální barvy plamene

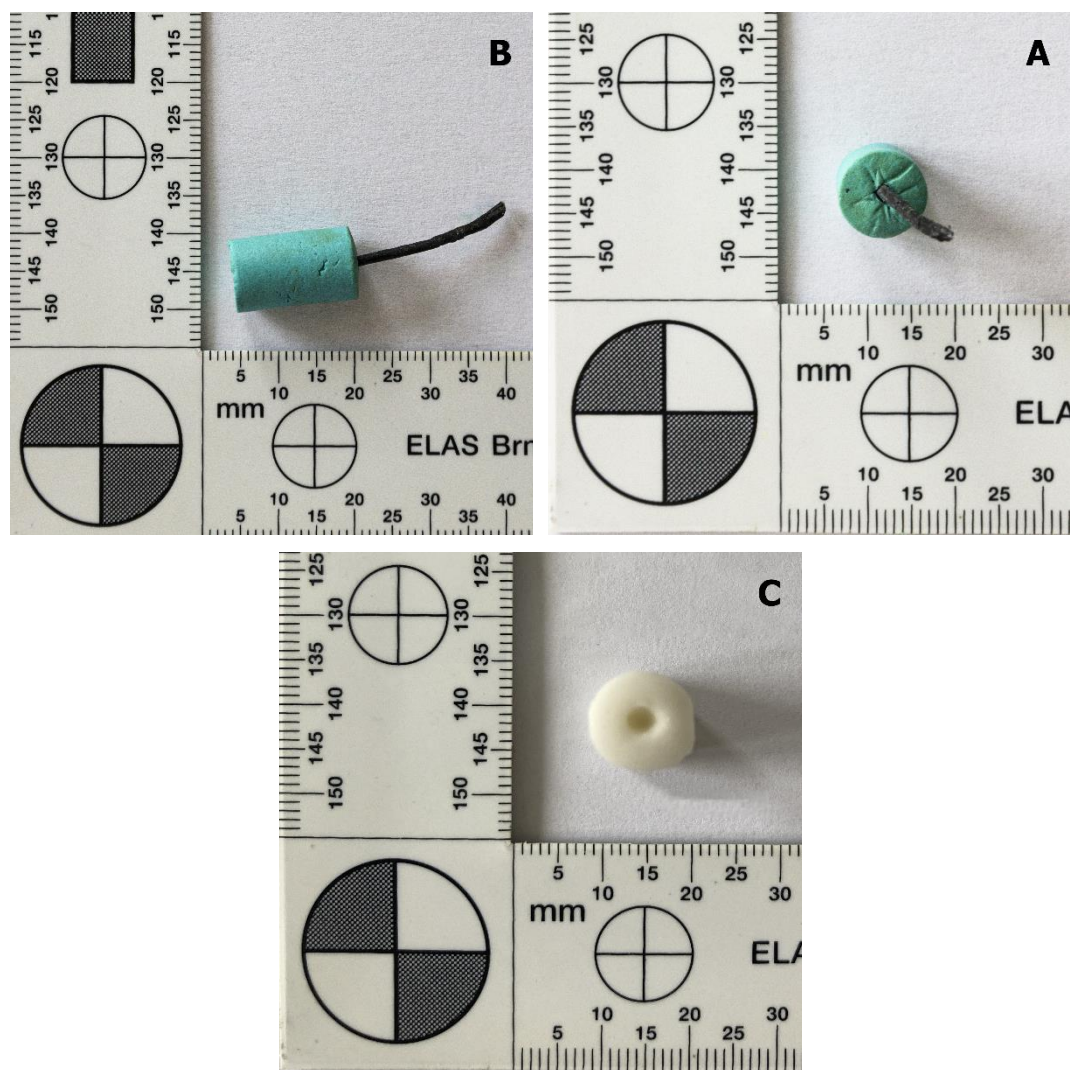
Přestože existuje standardizovaný postup, jak určovat čistotu barvy plamene a jeho barevnost [3], byly v této práci posuzovány pouze subjektivně. Důvodem byla nedostupnost zařízení a přístrojů pro standardizované a přístrojové stanovení zmíněných vlastností.

Pro určitou míru standardizace při porovnávání optimální barvy připravených složí byl použit následující postup:

Od každé připravené slože byl odebrán vzorek o hmotnosti 2 g. Ten byl následně v seříznuté plastové injekční stříkačce stlačen do tvaru válce o výšce 16 mm a průměru 11 mm (viz Obr. 3.1). Tím bylo zajištěno jednotné množství vzorku, který se následně zapaloval pro posouzení barvy plamene.

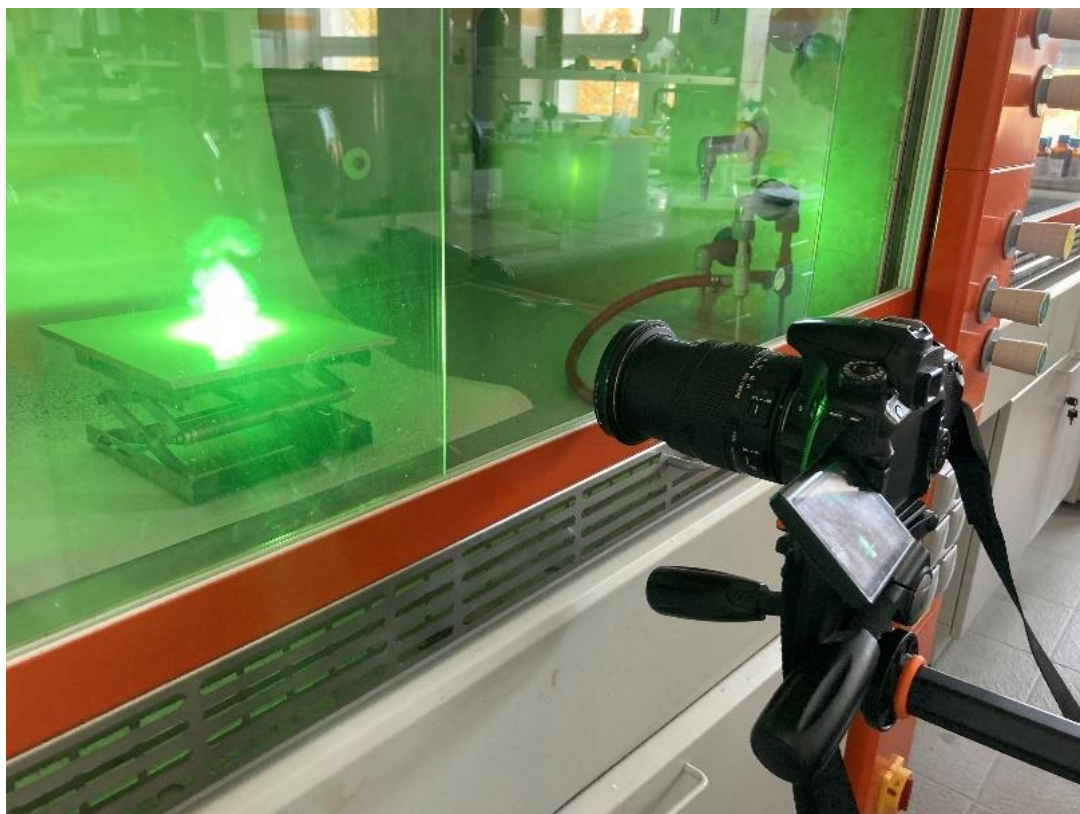
Do takto připravených vzorků modře hořících složí byla do hloubky 7 mm zasunuta stopina (viz Obr. 3.1), od které byl vzorek slože rovnoměrně zapalován od středu. Pro zapálení zeleně a červeně hořících složí nebyla stopina použita, jelikož

tyto slože nebylo možné stopinou zapálit. Do těchto složí byl proto svrchu vytvořen důlek do hloubky cca 7 mm (jako obdoba zasunuté stopiny) (Obr. 3.1), díky kterému byl usnadněn rovnoměrný zážeh slože od jejího středu.



**Obr. 3.1** Vzorek modré slože slisovaný do válečku se zasunutou stopinou pro zapálení (A – pohled shora; B – pohled z boku) a vzorek červené/zelené slože slisovaný do válečku s důlkem svrchu (C – pohled shora). (Foto: Tomáš Kudláček)

Připravené vzorky byly následně zapalovány v digestoři s vypnutým osvětlením před jednolitým čistým pozadím, které tvořil arch bílého papíru. Přes sklo digestoře byl poté pořizován videozáznam na digitální zrcadlovku Canon EOS 60D (Canon Inc.) s objektivem Sigma DC 17-50/2.8 EX HSM (Sigma Corporation) (viz Obr. 3.2). Z něho bylo možné zpětně vyhodnotit a porovnat barevnost plamene jednotlivých složí, čistotu barvy plamene a mimo jiné i samotný proces hoření.



**Obr. 3.2** Standardní uspořádání fotoaparátu a zapalovaných složí použité k pořizování záznamu z hoření připravených složí. (Foto: Tomáš Kudláček)

Nastavení fotoaparátu bylo pro natáčení všech hořících složí jednotné. Záznam byl pořizován ve *Full HD rozlišení* (1920 x 1080 px) při 25 FPS do formátu *.MOV*. Použitá ohnisková vzdálenost na objektivu byla 50 mm. Expozice byla nastavena manuálně – expoziční čas *1/50 sec.*, clona *f/13*, *ISO 250*. Pro vyvážení bílé bylo použito předdefinované nastavení odpovídající *bílému zářivkovému světlu*. Jako barevný profil byl použit *věrný profil*, který nijak neovlivňuje ostrost, kontrast, saturaci a tonalitu obrazu.

Hoření složí a barevnost plamene bylo posuzováno a vzájemně porovnáváno u všech připravených složí z videozáznamů; přihlíženo bylo k odrazu barvy na stěnách digestoře, který byl subjektivně zaznamenán do laboratorního deníku. Na základě toho byly vybrány slože s optimální barvou plamene. Při výběru byla zohledňována konzistence a adheze.

### **3.6 Výběr perspektivních složí**

Ze všech připravených složí bylo pro další měření v rámci experimentální části vybráno jen několik složí, které měly (podle kritérií uvedených výše) optimální

konzistenci a barvu plamene při hoření. Jako perspektivní slože byly z tohoto hlediska pro další práci vybrány **slože 4Č, 7Z a 7M**.

### 3.7 Stanovení chemické stability

Chemická stabilita byla sledována u vzorků skladovaných v uzavřené plastové lahvičce. Chemická stabilita byla stanovována metodou porovnávání infračervených spekter složů získaných pomocí FTIR spektrometru Nicolet iS50 FT-IR (výrobce Thermo Fisher Scientific) (Obr. 3.3) za použití jednodrazového diamantového ATR nástavce. Měření byla prováděna v rozsahu  $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  při počtu skenů 64. Pro zaznamenávání dat z analýzy a následné vyhodnocení byl použit software OMNIC 9 (Thermo Fisher Scientific).



**Obr. 3.3** Infračervený spektrometr Nicolet iS50 FT-IR (Thermo Fisher Scientific). (Převzato z thermofisher.com)

Chemická stabilita byla měřena pouze u **složů 1Č, 1Z a 1M** (jakožto složů připravených podle původního návodu), **3Č, 3Z a 3M** (jakožto složů s nejvyšším podílem pojiv a paliv) a **4Č, 7Z a 7M** (jakožto nejperspektivnějších složů z hlediska konzistence a barvy plamene).

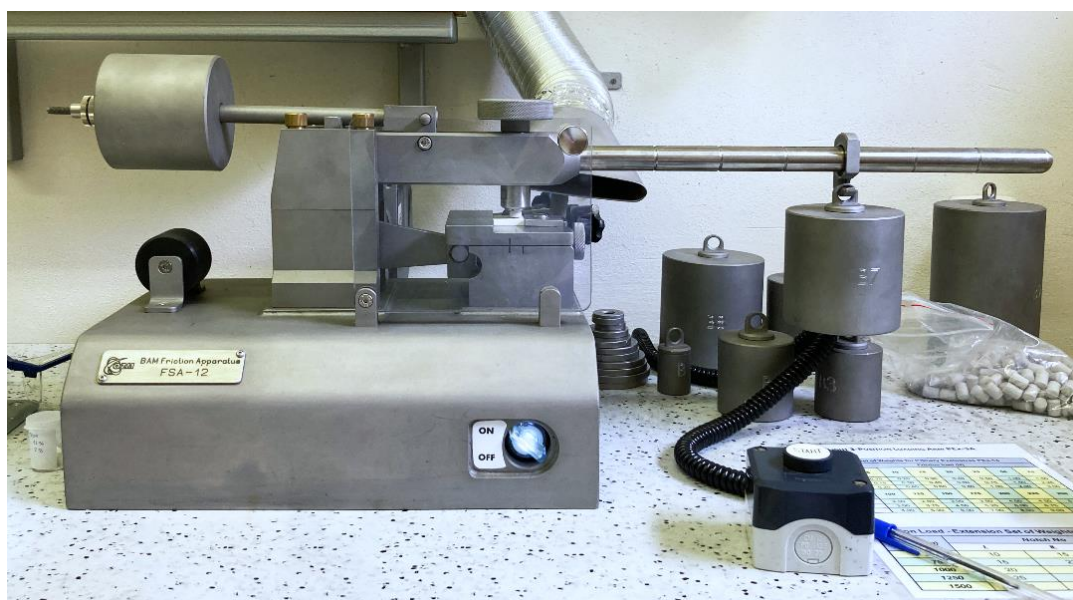
Vzorek z vybraných složů byl na zmíněném přístroji proměřen bezprostředně po přípravě a poté s odstupem 5 týdnů od přípravy. Mezitím byl vzorek uchovávan v těsně uzavřené plastové nádobě a otevírán byl pouze na nezbytně nutnou dobu, např. kvůli sledování a měření dalších vlastností.

U **složů 1Č, 3Č, 1Z a 3Z** byla chemická stabilita sledována i při skladování v petriho misce v laboratoři s volným přístupem. Na IR spektroskopu byly změřeny

bezprostředně po přípravě a poté s 2týdenním odstupem. Poté byly vzorky kontaminovány a z dalších měření byly vynechány.

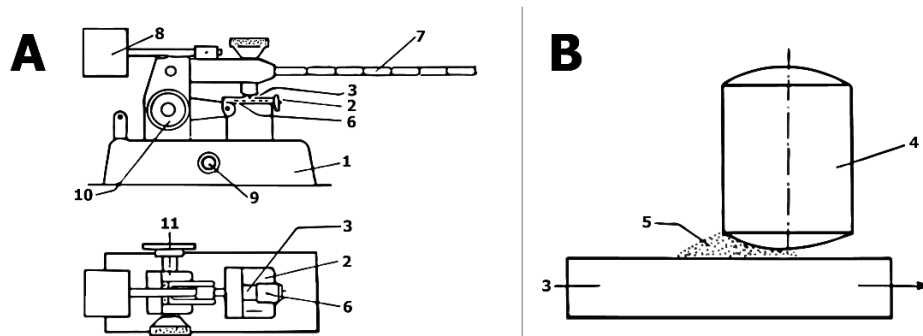
### 3.8 Stanovení citlivosti ke tření

Citlivost složí ke tření byla zjišťována na třecím zařízení BAM Friction Apparatus FSA-12 (výrobce OZM Research) s 6pozicovým zatěžovacím ramenem BAM-6A (viz Obr. 3.4) a standardní sadou závaží BAMW B1-B9. Pro zkoušku byly použity porcelánové destičky BFST-Pt-100 a porcelánové kolíky BFST-Pn-400.



**Obr. 3.4** Třecí zařízení BAM Friction Apparatus FSA-12 (OZM Research) se závažím B7 umístěným na 4. drážce ramene ( $F = 128 \text{ N}$ ). V rameni je upnut porcelánový kolík BFST-Pn-400, pod ním je v křížáku upnuta porcelánová destička BFST-Pt-100. Na destičce pod kolíkem je umístěn vzorek slože. (Foto: Tomáš Kudláček)

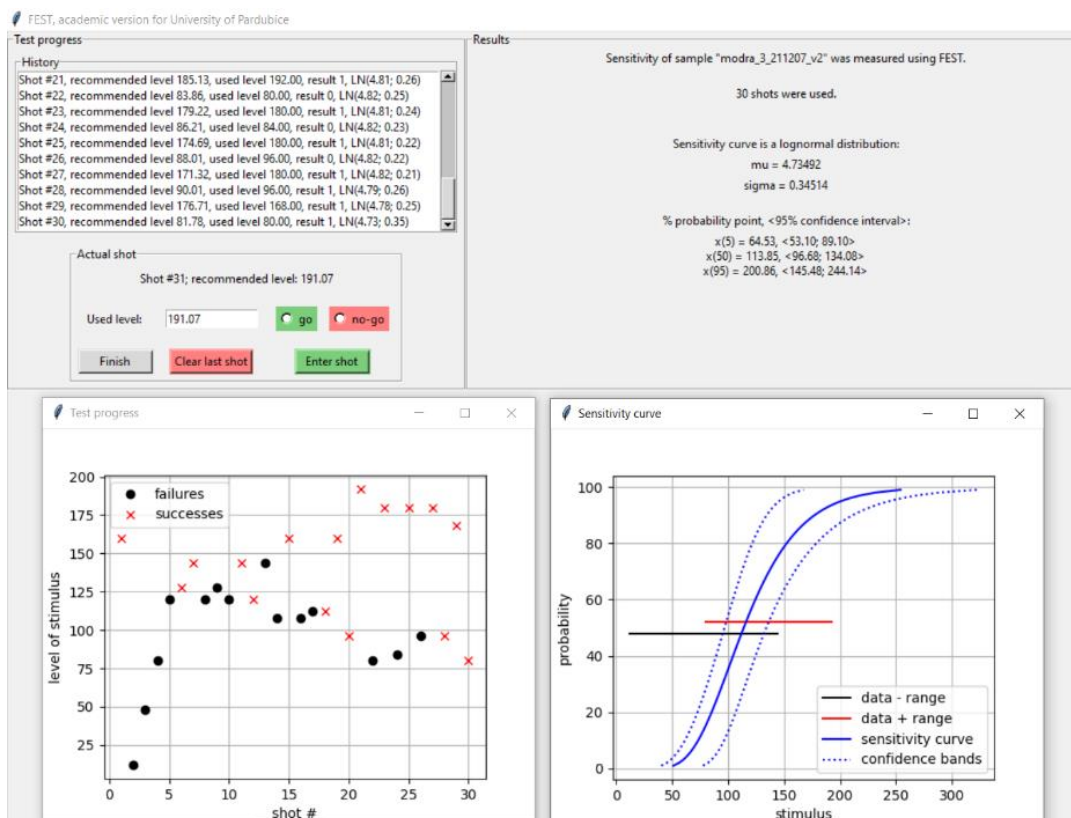
Pro stanovení citlivosti byl vzorek dané slože umístěn v množství předepsaném vyhláškou na porcelánovou destičku pod porcelánový kolík (viz Obr. 3.5). Na rameno třecího přístroje byla umísťována závaží podle požadované třecí síly. Při jednom měření se vzorek pod zatíženým kolíkem pohyboval jednou tam a zpět v dráze 10 mm za 0,44 s. Pro každé měření byl použit nový vzorek, nový porcelánový kolík a nová destička (resp. čisté a nepoužité místo na destičce). Vzorek byl pro danou třecí sílu citlivý, pokud je výsledek pozitivní. Výsledek měření se považuje za pozitivní, pokud dojde k výbuchu/iniciaci. Projevem iniciace byl třesk, praskání, jiskření nebo hoření. [10]



**Obr. 3.5** Schéma třecího přístroje (boční a půdorysný pohled) (A) a výchozí polohy vzorku mezi válečkem a destičkou (B), kde 1 je ocelový podstavec; 2 jsou pohyblivé sáně; 3 je porcelánová destička 25 x 25 x 5 mm, upevněná na saních; 4 je upevněný porcelánový kolík (průměr 10 mm, délka 15 mm); 5 je zkoušený vzorek (10 mm<sup>3</sup>); 6 je držák kolíku; 7 je zatěžovací rameno; 8 je vyrovnávací závaží; 9 je vypínač; 10 je kolečko pro nastavení saní do výchozí polohy; 11 je směr k elektromotoru. (Upraveno podle Vyhlášky č. 222/2004 Sb.)

Každá z vybraných složů byla takto měřena právě třicetkrát. Pro postup měření a samotné stanovení křivky citlivosti byla použita metoda/algorithmus FEST (Fast and Efficient Sensitivity Testing). Tento algoritmus v podobě počítačového programu (viz Obr. 3.6) sám vypočítává úroveň zatížení (třecí sílu) podle předchozích použitých zatížení, jim příslušné odezvy testu (pozitivní/negativní výsledek) a jejich vzájemných překryvů. FEST poté na základě třiceti měření vytvoří křivku citlivosti. [12]

Výsledkem stanovení je křivka v grafu, kde je na ose  $y$  vynášena pravděpodobnost iniciace [%] a na ose  $x$  třecí síla v newtonech [N] citlivosti. Jako citlivost ke tření je pak uváděna třecí síla, při které má slož 50% pravděpodobnost k iniciaci.



**Obr. 3.6** Snímek obrazovky z programu FEST. V levé horní části je zaznamenán počet zkoušek, softwarem doporučená třecí síla [N] a reálně použitá třecí síla [N]. V pravé horní části je výsledek zkoušky s uvedenou třecí silou [N] pro 5%, 50% a 95% pravděpodobnost iniciace. Vlevo dole je zaznamenáván průběh měření – pozitivní a negativní odezvy. Vpravo dole je křivka znázorňující citlivost ke tření se svým pásem 95% spolehlivosti. (Foto: Tomáš Kudláček)

Data z průběhu zkoušek citlivosti ke tření pro dané slože jsou přiložena jako Příloha III.

Vzhledem k časové náročnosti měření nebyla zkouška citlivosti vůči tření prováděna u všech připravených složí. Pro každou barvu plamene tak byly vybrány pouze:

- slože připravené podle původního složení a postupu od Radovana Skácela (viz Příloha II), tedy **slože 1Č, 1Z a 1M**,
- slože s největším podílem polypropylenglykolu, aby bylo možné určit závislost citlivosti ke tření na množství použitého pojiva (**slože 3Č, 3Z a 3M**),
- slože jevící se jako nejperspektivnější z hlediska konzistence a barvy plamene při hoření (**slože 4Č, 7Z a 7M**).

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 4.1 Konzistence, adheze, čistota barvy plamene a průběh hoření

Konzistenci daných složí bylo možné nejvíce ovlivnit množstvím kapalného pojiva, kterým byl polypropylenglykol. Polypropylenglykol, stejně jako další organické polymery, v pyrotechnických složích plní zároveň funkci paliva [3], [5] a jako další organické sloučeniny tak může ovlivnit barvu plamene [5]. Z těchto důvodů byla úprava složení kvůli konzistenci řešena s ohledem na barvu plamene.

Nejlepší barvu plamene i chod hoření měly slože připravené podle původního návodu od Mgr. Radovana Skácela, Ph.D. (viz Příloha II; v práci označované jako 1Č, 1Z a 1M). Tyto měly zároveň naprosto minimální adhezi. Naopak nebyly téměř vůbec soudržné, velmi se drolily a nebyly plastické.

Nejvíce vyhovující konzistenci měly slože s nejvyšším množstvím kapalného polypropylenglykolu jako pojiva, tedy slože 3Č, 3Z a 3M. V důsledku velkého obsahu pojiva (více než 20 %) byly plameny těchto složí při hoření výrazně znečištěné a byly spíše oranžové.

Bylo proto potřeba najít takové poměry látek, díky kterým by slož splňovala nároky na optimální konzistenci (dobrá plasticita, soudržnost, dělitelnost a tvarovatelnost rukou, malá adheze) a zároveň by měla vyhovující barvu plamene (jednoznačná a čistá barva plamene). Slož s takovými poměry látek byla označena jako optimální.

Ze všech připravených složí hořely nejrychleji a nejvýrazněji slože pro modrý plamen. Ty bylo zároveň možné zažehnout přes stopinu. U červeně a zeleně hořících složí nenastala spolehlivě iniciace přes stopinu.

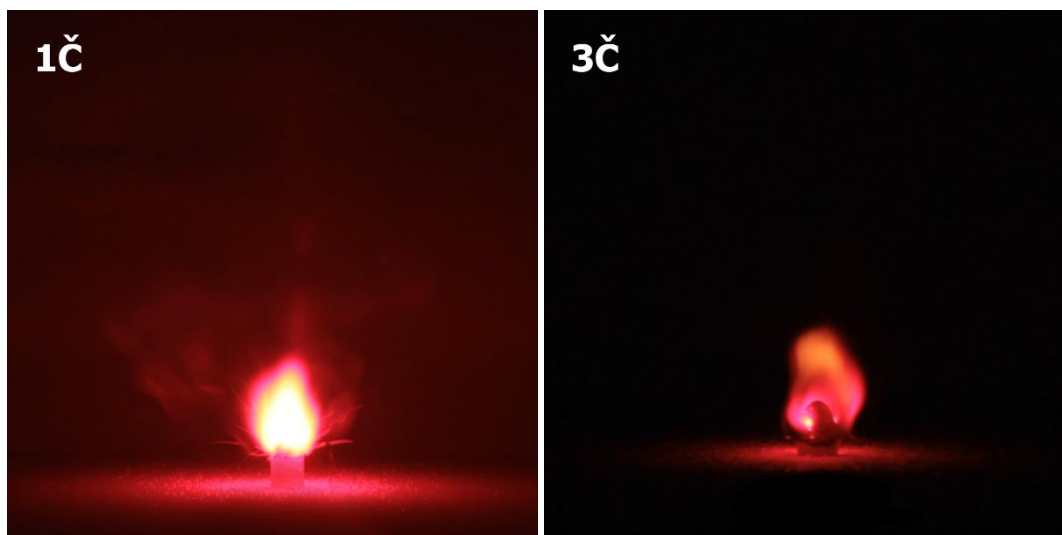
#### 4.1.1 Červeně hořící slože

Jako první byla podle původního složení (viz Příloha II) připravena **slož 1Č**. Připravená slož s původními poměry látek (viz Tab. 3.1) měla nevyhovující konzistenci – drolila se a kvůli tomu z ní nebylo možné vytvořit jednu souvislou hmotu. Adhezi vůči rukavicím nebo laboratorním pomůckám měla naprosto minimální.

Nebylo možné ji spojit do jednoho celku a velmi se drolila. Naopak měla nejčistší a nejjasnější barvu plamene a plynulý průběh hoření.

Jako další byly připraveny **slože 2Č** a **3Č** s větším množstvím polypropylenglykolu, s cílem zlepšit konzistenci. Ve **slož 2Č** bylo pojiva 1,5x více než ve slož 1Č (viz Tab. 3.1). **Slož 3Č** byla připravena s dvojnásobným množstvím polypropylenglykolu než slož 1Č (viz Tab. 3.1). Postup přípravy byl stejný jako u první červené slož 1Č.

Ve **slož 3Č** tak byl podíl pojiva vyšší než 20 % a celkové množství organických paliv tvořilo 23,22 % hmotnosti slož. Tato slož byla ze všech připravených nejvíce plastická a soudržná. Zároveň měla vyšší adhezi vůči laboratornímu sklu, pomůckám a rukavicím než ostatní připravené slož. Nebylo proto možné ji jednoduše dělit špachtlemi. Velké množství organických pojiv také znamenalo výrazný negativní vliv na hoření slož a produkovanou barvu plamene. Dým byl velmi znečištěn sazími a barva plamene byla při hoření výrazně oranžová (viz Obr. 4.1). Zvýšený podíl polypropylenglykolu (v kombinaci s polyethylenoxidem) zároveň ovlivňoval hoření – slož hořela přerušovaně a „skomírala“. Vysoká plasticita taktéž nebyla příliš pozitivní – slož bylo možné libovolně formovat, ale dlouho nevydržela v původním tvaru, jelikož se kvůli velkému podílu tekutých pojidel „roztékala“.



**Obr. 4.1** Porovnání hoření a barvy slož 1Č a 3Č. (Foto: Tomáš Kudláček)

Z hlediska barvy plamene byla téměř optimální slož 2Č. Barva plamene byla jasná a nezaměnitelná s minimem oranžového/žlutého znečištění. Z hlediska konzistence však optimální nebyla – při hnětení sice nebyla slož adhezivní vůči

latexovým rukavicím, bylo možné vytvořit jeden soudržný celek ale při silném stlačení praskala a drolila se v krajích.

Byla proto připravena **slož 4Č**. Její složení vycházelo z původních poměrů použitých při míchání slože 1Č. Cílem bylo zachovat poměry paliv a okysličovadel, ale zároveň zlepšit konzistenci. Při přípravě proto nebyl použit polyethylenoxid a jeho 2% podíl ve směsi byl přidán k polypropylenglykolu. Slož 4Č se ukázala jako optimální z hlediska konzistence i barvy plamene.

S několikátýdenním odstupem se ale jako optimální z hlediska konzistence i barvy plamene jevila i slož 1Č. Její konzistence se zlepšila, současně zůstala zachována minimální adheze. To bylo pravděpodobně způsobeno důkladnou homogenizací slože v průběhu času při skladování v uzavřené nádobě, které nebylo možné dosáhnout mícháním při přípravě.

Z hlediska bezprostředního použití po přípravě je nejvíce vyhovující **slož 4Č**. Konzistence se v průběhu času výrazně nemění, na rozdíl od slože 1Č. Pokud je však použití slože zamýšleno až po několika týdnech od její přípravy, je vhodnější slož 1Č. S odstupem od přípravy se její konzistence blíží složi 4Č, ale zároveň zachovává lepší barevnost než slož 4Č.

Slože pro červenou barvu plamene hořely poměrně jasně a kontinuálně. Nehořely ale rovnoměrně. Výsledný efekt při hoření tak byl spíše stroboskopický. Tyto slože zároveň nebylo možné zapálit přes stopinu – iniciace se občas zdařila, ale to byla spíše výjimka. (Ne)zapálení slože od stopiny nebylo ovlivněno geometrií slože. Na iniciaci přes stopinu by mohlo mít vliv zapalované množství slože – to ovšem nebylo možné z nedostatku času a chemikálií ověřit.

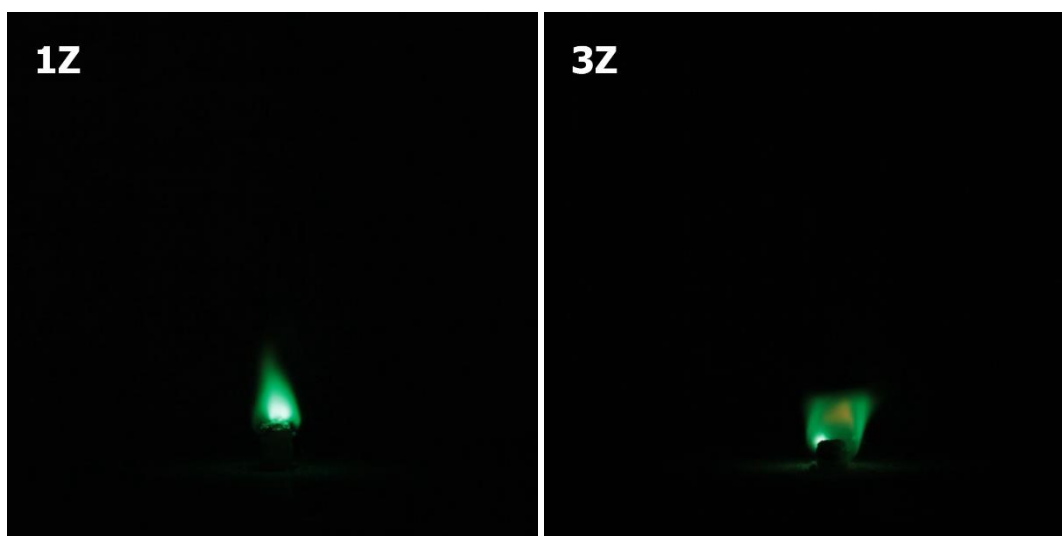
#### **4.1.2 Zeleně hořící slože**

Nejčistší a nejjasnější barvu plamene a plynulý průběh hoření měla **slož 1Z** (připravená podle původního návodu). Bezprostředně po přípravě ale neměla optimální konzistenci – drolila se a kvůli tomu z ní nebylo možné vytvořit jednu souvislou hmotu. Naopak adhezi vůči rukavicím nebo laboratorním pomůckám měla naprosto minimální.

Jako další byly připraveny **slože 2Z** a **3Z** s větším množstvím polypropylenglykolu, což mělo zlepšit konzistenci. Ve **slož 2Z** byla pojiva 1,5x více než ve slož 1Z (viz Tab. 3.2). **Slož 3Z** byla připravena s dvojnásobným množstvím

polypropylenglykolu než slož 1Z (viz Tab. 3.2). Postup přípravy byl stejný jako u první červené slože 1Z.

Ve **slož** **3Z** tak byl podíl pojiva vyšší než 20 % a celkové množství organických paliv tvořilo 23,22 % hmotnosti slože. Tato slož byla nejvíce plastická a soudržná ze všech připravených zeleně hořících složí. Zároveň měla velmi vysokou adhezi vůči laboratornímu sklu, pomůckám a rukavicím než ostatní připravené slože. Velké množství organických pojiv zároveň znamenalo výrazný negativní vliv na hoření slože a produkovanou barvu plamene. Dým byl velmi znečištěn sazemi a barva plamene byla při hoření výrazně oranžová (viz Obr. 4.2). Zvýšený podíl polypropylenglykolu (v kombinaci s polyethylenoxidem) zároveň ovlivňoval hoření – slož hořela přerušovaně a „skomírala“. Vysoká plasticita taktéž nebyla příliš pozitivní – slož bylo možné libovolně formovat, ale dlouho nevydržela v původním tvaru, jelikož se kvůli velkému podílu tekutých pojidel „roztékala“.



**Obr. 4.2** Porovnání hoření a barvy složí 1Z a 3Z. (Foto: Tomáš Kudláček)

Z hlediska barvy plamene byla dostatečně kvalitní slož 2Z. Barva plamene byla jasná a nezaměnitelná s minimem oranžového/žlutého znečištění. Z hlediska konzistence však optimální nebyla – při hnětení sice nebyla slož adhezivní vůči latexovým rukavicím, bylo možné vytvořit jeden soudržný celek ale při silném stlačení praskala a drolila se v krajích.

Bylo proto připraveno několik dalších složí – **slož** **4Z–6Z**. U těch byla snaha zvýšit podíl polypropylenglykolu na celkovém složení směsi. Množství pojiva ale nemohlo být tak vysoké jako u slože 3Z, jelikož mělo výrazný negativní vliv na hoření a barvu plamene. Navyšování procentuálního podílu polypropylenglykolu tak bylo prováděno ubíráním polyethylenoxidu, až byl nakonec zcela vynechán. Ve **slož** **6Z**

byla snaha zlepšit barevnost plamene navýšením množství dusičnanu barnatého na 48 %. Tato změna však nenaplnila očekávání, stejně jako další ze složí 4Z-6Z. Proto byly z další práce vynechány.

Jako poslední tedy byla připravena **slož 7Z**. Její složení vycházelo z původních poměrů použitých při míchání slože 1Z. Cílem bylo zachovat poměry paliv a oksylichovadel, ale zároveň zlepšit konzistenci. Při přípravě proto nebyl použit polyethylenoxid a jeho 2% podíl ve směsi byl přidán k polypropylenglykolu (viz Tab. 3.2). Tato slož se ukázala jako optimální pro použití bezprostředně po přípravě. Dodržuje původní poměry oksylichovadel a paliv/pojiv, ale zároveň zlepšuje konzistenci, jelikož funkci paliva a pojiva zastává pouze polypropylenglykol (polyethylenoxid nebyl při přípravě této slože použit). Slož 7Z má optimální barvu plamene i průběh hoření, má malou adhezi vůči různým materiálům, je soudržná jako celek a je plastická. Konzistence se v průběhu času výrazně nemění, na rozdíl od slože 1Z. U slože 1Z se s několikátýdenním odstupem konzistence zlepšila, zároveň ale neměla negativní dopad na adhezi. To bylo pravděpodobně způsobeno důkladnou homogenizací slože, které nebylo možné dosáhnout mícháním při přípravě.

Slože pro zelenou barvu plamene hořely ze všech připravených složí nejslabším plamenem. Tyto slože zároveň nebylo možné zapálit přes stopinu – iniciace se občas zdařila, ale to byla spíše výjimka. (Ne)zapálení slože od stopiny nebylo ovlivněno geometrií slože. Na iniciaci přes stopinu by mohlo mít vliv zapalované množství slože – to ovšem nebylo možné z nedostatku času a chemikálií ověřit.

I přes zapálení složí od středu zeleně hořící slože v průběhu hořely od vnějšku ke středu, přičemž kopírovaly tvar, do kterého byly formovány. Slože pro zelenou barvu často v průběhu hoření zhasínaly a začínaly hořet znovu, obzvláště ke konci pelety.

#### **4.1.3 Modře hořící slože**

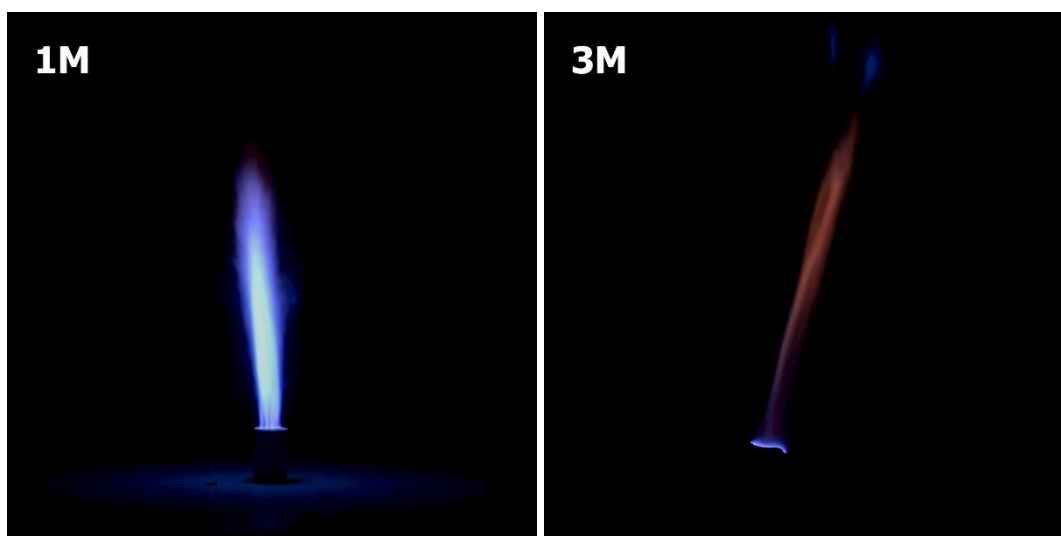
Konzistence modře hořících složí byla obecně horší než u složí zbylých dvou barev. Bazický dusičnan měďnatý, ze kterého byly slože pro modrou barvu plamene připravovány, má totiž výrazně nižší sypanou hustotu než např. dusičnan barnatý. Větší objem sypkých látek vedl k většímu naředění pojiv a tím pádem nebyly slože dostatečně plastické.

Nejvíce plastická byla – stejně jako u červeně a zeleně hořících složí – slož s největším obsahem polypropylenglykolu, tedy **slož 3M**. Vliv zvýšeného množství

pojiva na barvu plamene při hoření byl však výraznější než u zeleně/červeně hořících složí. Slož 3M hořela modře pouze na povrchu a celý plamen měl (kromě špičky) oranžovou barvu.

**Slož 1M** připravená podle původního návodu byla nejvíce sypká. Konzistence se však u této slož (stejně jako u složí zbylých dvou barev, které byly připraveny podle původních poměrů látek) v čase vyvíjela. Směs se v uzavřené nádobě pravděpodobně postupně lépe homogenizovala. Slož 1M tak po několika týdnech od přípravy měla také plastickou konzistenci, ne však optimální – stále se velmi drolila. Neměla ale téměř žádnou adhezi vůči laboratorním pomůckám nebo rukavicím. Ze všech připravených složí pro modrý plamen měla slož 1M nejjasnější a nejvýraznější barvu při hoření.

Při porovnání hoření složí 1M a 3M byl nejvýrazněji vidět vliv velkého množství polypropylenglykolu v celkovém složení směsi (viz Obr. 4.3).



**Obr. 4.3** Porovnání hoření a barvy složí 1M a 3M. (Foto: Tomáš Kudláček)

Výše uvedené slože měly při hoření velmi jasný plamen a bílý dým, které občas způsobily nejednoznačnost barvy plamene. Slože hořely spíše bíle, respektive velmi světle modře.

Byly proto připraveny **slože 4M–6M**, na kterých byly zkoušeny jiné poměry látek za účelem zlepšení projevu modré barvy v plamenu. Tyto slože ale neměly optimální konzistenci, hůře hořely nebo se kladná změna v barvě plamene neprojevila. Proto byly tyto slože z další práce vynechány.

Jako poslední byla proto připravena slož 7M, která byla z hlediska konzistence bezprostředně po přípravě a barvy plamene označena za optimální. Má malou adhezi

vůči různým materiálům, je soudržná jako celek a je plastická. Konzistence se v průběhu času výrazně nemění, na rozdíl od slože 1Z. Průběh hoření je plynulý.

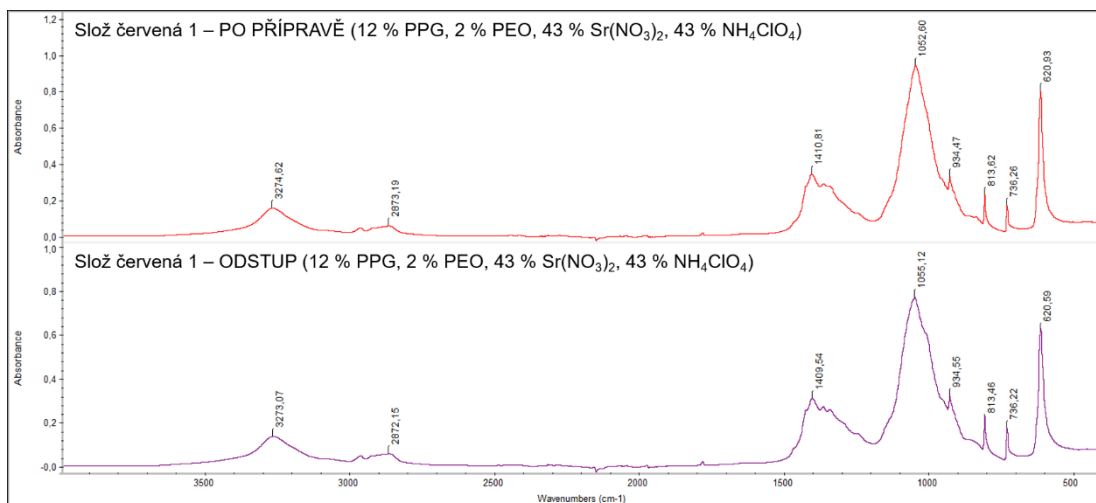
Slože s modrou barvou plamene obecně hořely nepřerušovaně, výrazně větším plamenem, jasněji a rychleji než slože pro zelenou a červenou barvu. 2 g modře hořící slože ve válečku o průměru 11 mm a výšce 16 mm hořely přibližně 6-7 sec. Např. stejné množství slože pro červenou barvu v totožném tvaru hořely zhruba 39 sec. (1Č – s nejmenším množstvím polypropylenglykolu) nebo 60 sec. (3Č – s největším množstvím polypropylenglykolu). U modrých složí navíc nebyl tak velký rozdíl v době hoření mezi složemi s menším a vyšším podílem pojidla.

Modře hořící slože také bylo možné zapálit přes stopinu. To se u ostatních složí povedlo jen výjimečně.

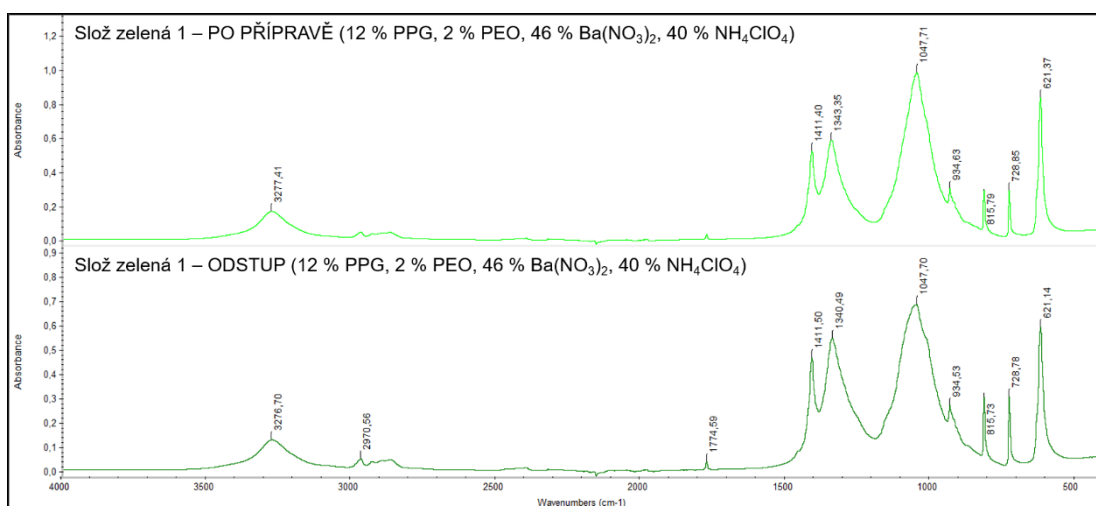
## 4.2 Chemická stabilita

Chemická stabilita byla sledována u červeně hořících **složí 1Č, 3Č a 4Č**, zeleně hořících **1Z, 3Z a 7Z** a modře hořících **1M, 3M a 7M**. Tyto slože byly měřeny podle postupu uvedeného v kapitole 3. Slože byly měřeny bezprostředně po přípravě a poté s 5týdenním odstupem. Chemická stabilita byla zjišťována na základě porovnávání IR spekter.

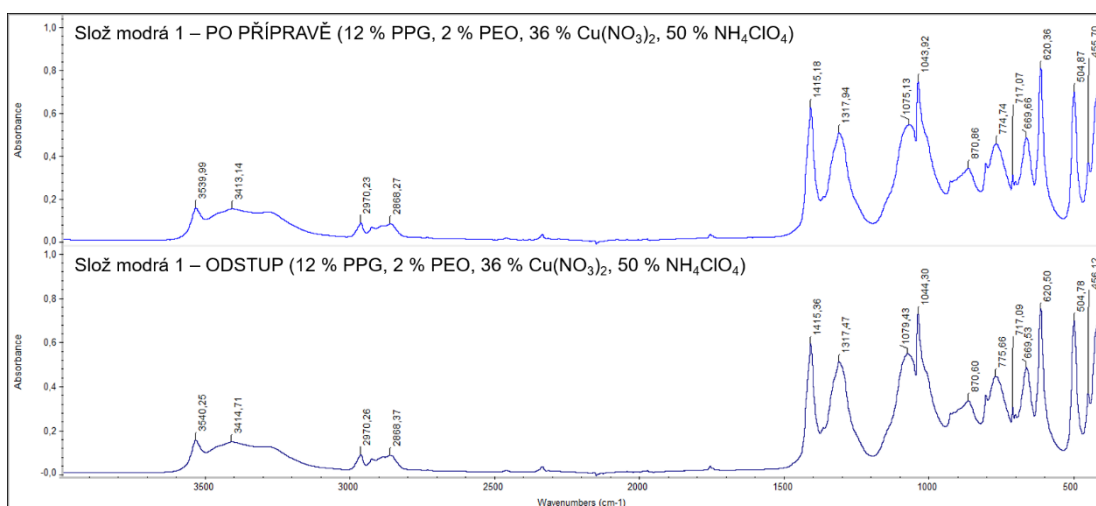
Jednotlivá spektra se u daných složí lišila pouze minimálně ve vlnočtech u jednotlivých pásů (viz Obr. 4.4–Obr. 4.12), což bylo pravděpodobně způsobeno tím, jak moc byl vzorek při měření přitlačen na ATR krystal. Na spektrech se ani po několika týdnech od přípravy neobjevují nové pásy (viz Obr. 4.4–Obr. 4.12), což znamená, že se komponenty slože v průběhu času měřitelně nerozkládají. Při skladování v uzavřených nádobách v laboratorních podmínkách jsou tím pádem zmíněné kompozice chemicky stabilní v řádu týdnů.



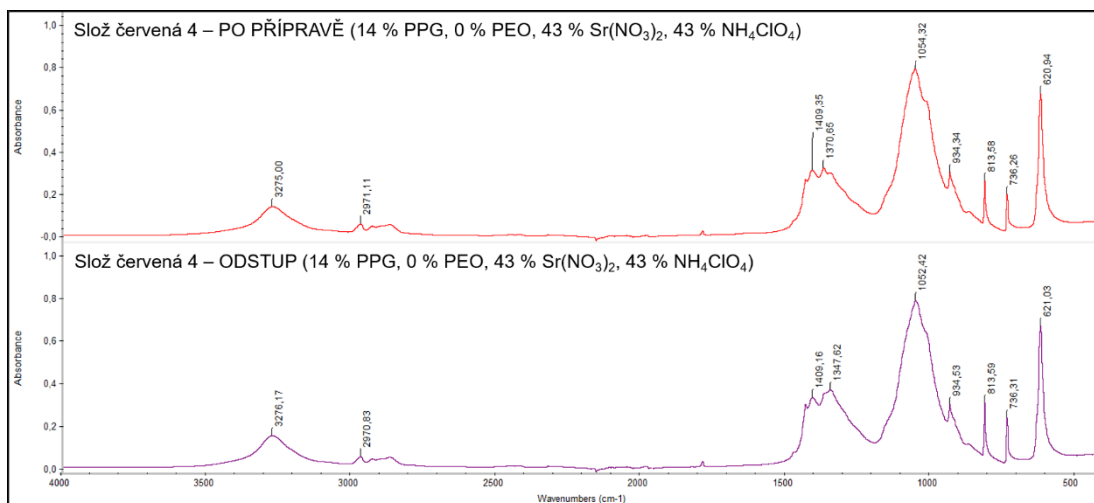
**Obr. 4.4** Infračervené spektrum červené složky 1 (1Č) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole).



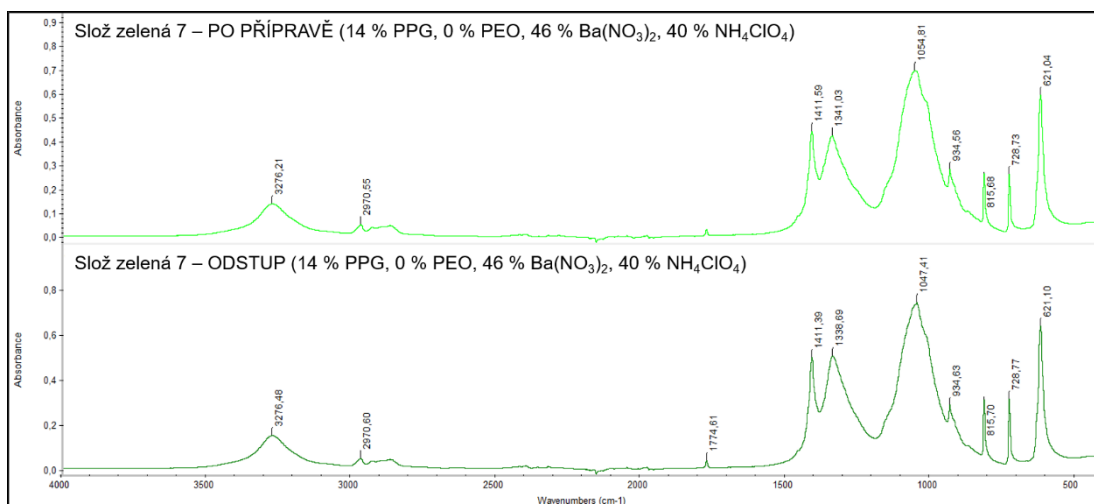
**Obr. 4.5** Infračervené spektrum zelené složky 1 (1Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole).



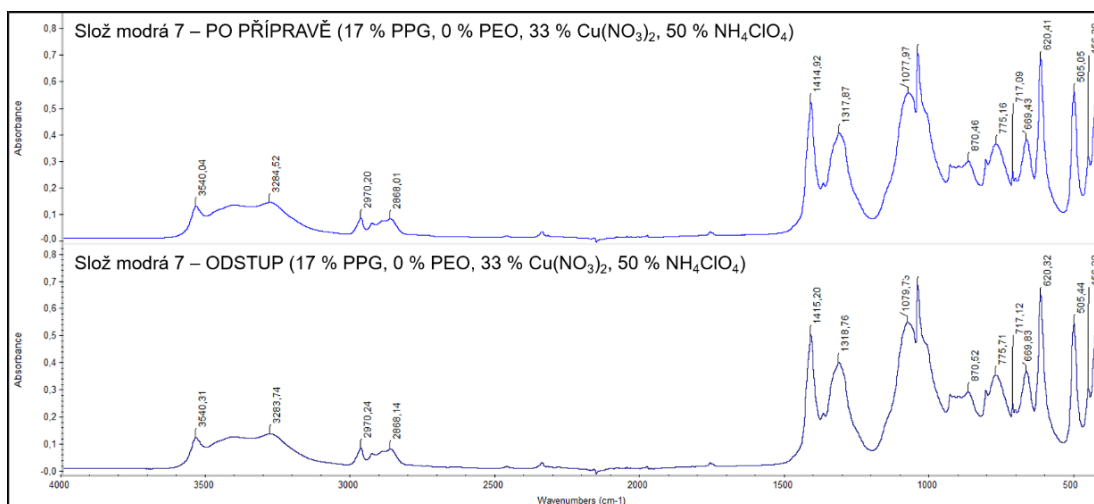
**Obr. 4.6** Infračervené spektrum modré složky 1 (1M) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole).



**Obr. 4.7** Infračervené spektrum červené složky 4 (4Č) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole).

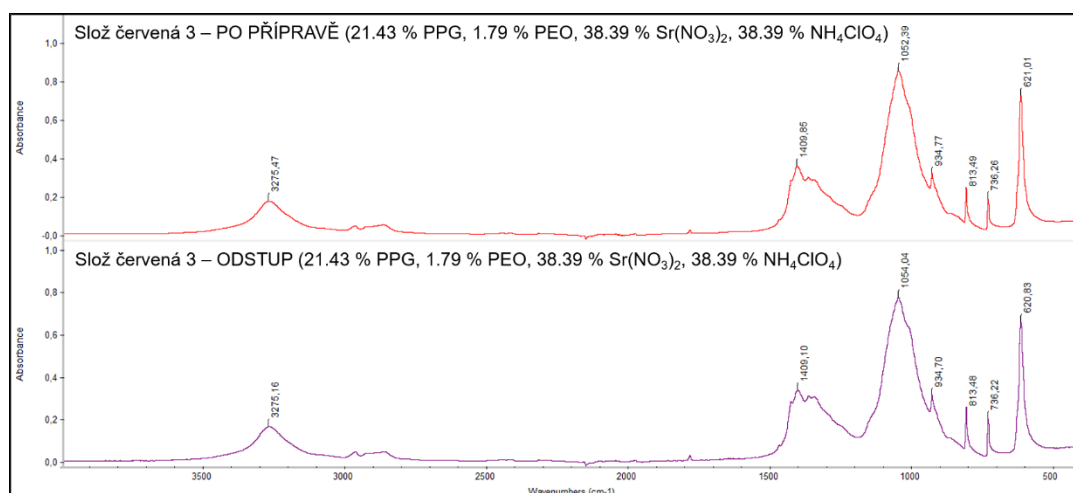


**Obr. 4.8** Infračervené spektrum zelené složky 7 (7Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole).

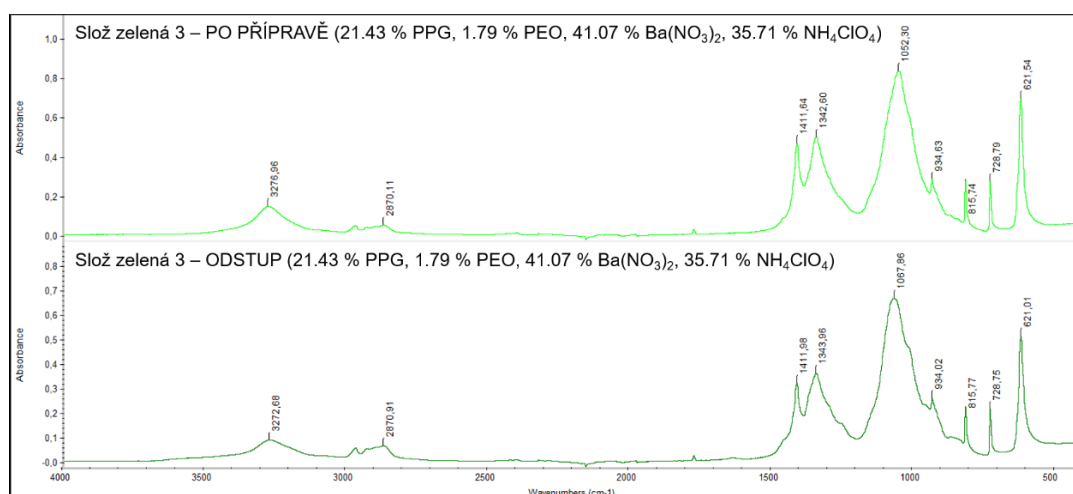


**Obr. 4.9** Infračervené spektrum modré složky 7 (7M) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole).

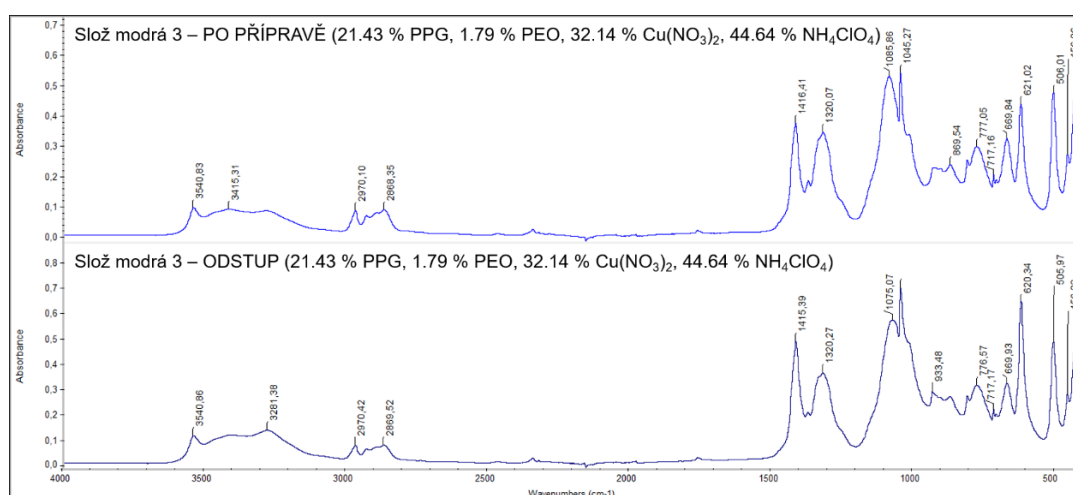
Na chemickou stabilitu nemá vliv ani zvýšené množství polypropylenglykolu ve složi. To je vidět na Obr. 4.10, Obr. 4.11 a Obr. 4.12 níže:



**Obr. 4.10** Infračervené spektrum červené slože 3 (3C) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole).



**Obr. 4.11** Infračervené spektrum zelené slože 3 (3Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole).



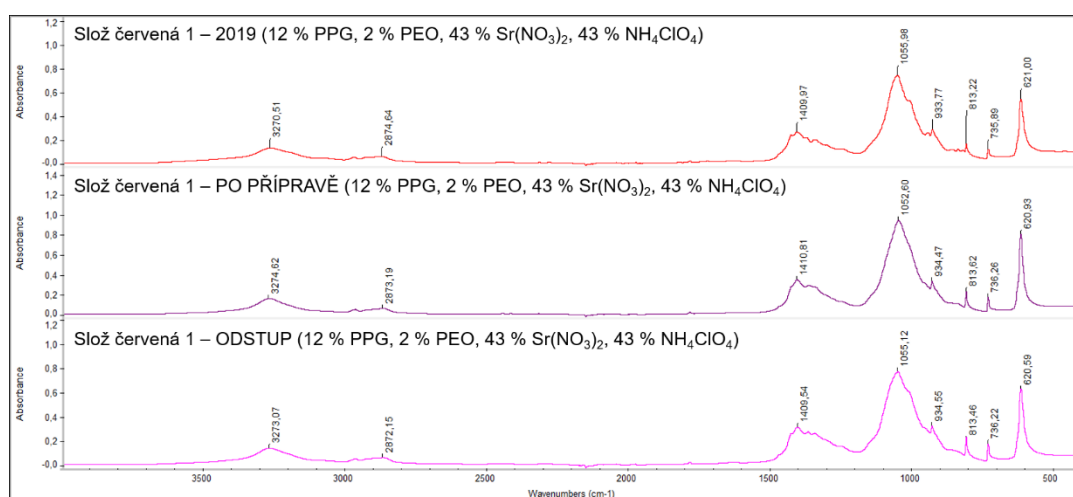
**Obr. 4.12** Infračervené spektrum modré slože 3 (3M) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 5 týdnů po namíchání (dole).

## 4.2.1 Porovnání chemické stability složí se vzorkem z roku 2019

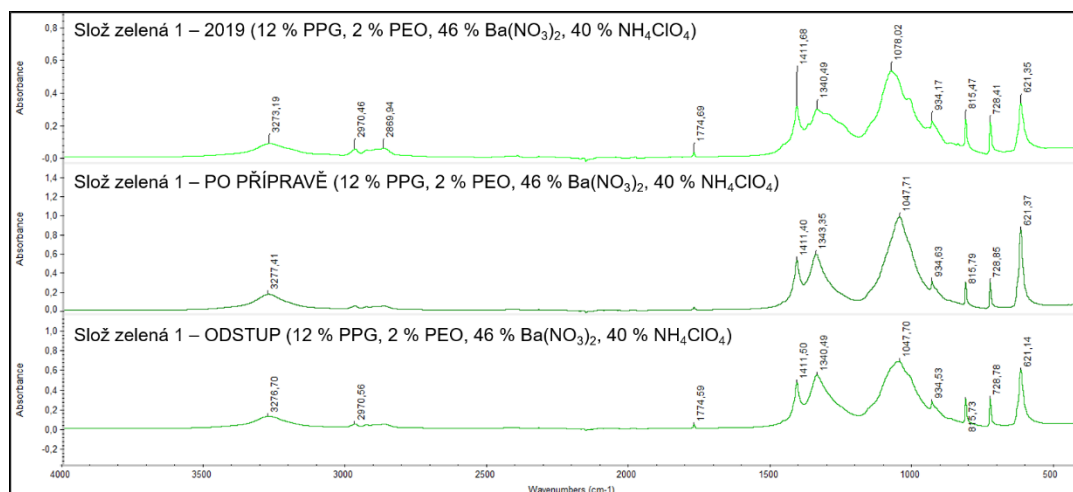
### 2019

Spektra složí 1Č a 1Z byla porovnána se spektry, která byla naměřena pro slože připravené v roce 2019 podle stejných poměrů látek původní slože od Mgr. Radovana Skácela, Ph.D. Ani tam nebyla zjištěna změna v IR spektrech (viz Obr. 4.13 a Obr. 4.14 a slože připravené podle původních poměrů látek (viz Příloha II) jsou tedy patrně stabilní i v řádu několika let.

Pro modře hořící slože nebyly starší vzorky k dispozici.



**Obr. 4.13** Infračervené spektrum červené slože 1 (1Č) připravené v roce 2019 (nahore), bezprostředně po jejím namíchání (uprostřed) a 5 týdnů po namíchání (dole).

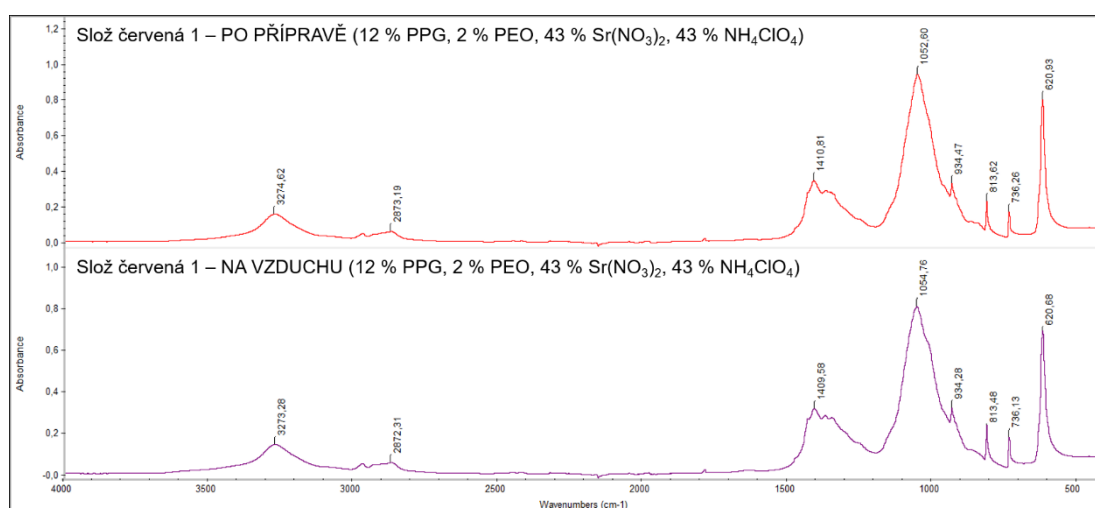


**Obr. 4.14** Infračervené spektrum zelené slože 1 (1Z) připravené v roce 2019 (nahore), bezprostředně po jejím namíchání (uprostřed) a 5 týdnů po namíchání (dole).

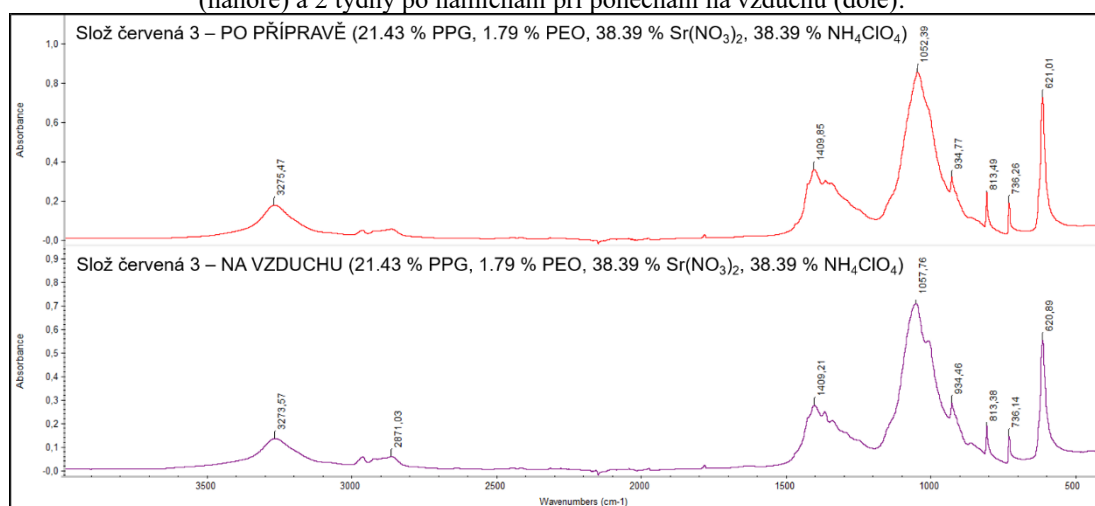
## 4.2.2 Chemická stabilita červeně a zeleně hořících složí při ponechání na vzduchu

U složí 1Č, 3Č, 1Z a 3Z byla zjišťována i chemická stabilita při ponechání v laboratorních podmínkách volně na vzduchu. V rámci cca 2 týdnů byly slože stabilní (spektra složí bezprostředně po přípravě a s odstupem při ponechání na vzduchu se nelišila, viz Obr. 4.15–4.18). Poté se ale začal měnit vnější vzhled složí (viz Obr. 4.19). Do misky, ve kterých byly slože na vzduchu, pravděpodobně spadlo něco z okolí, případně se na ně přes rukavice dostal inkoust z propisky. Z dalších měření proto byly vynechány.

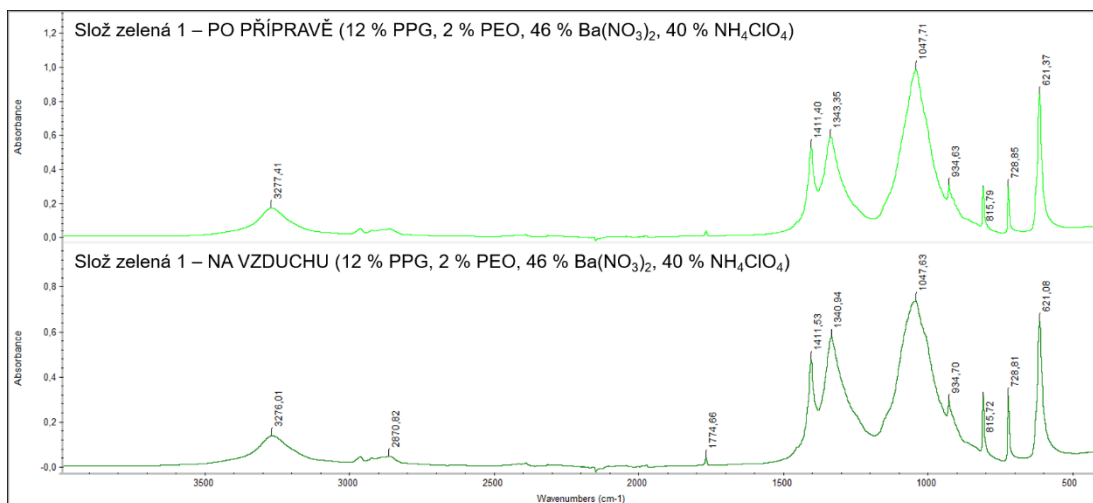
U modře hořících složí nebyla chemická stabilita při ponechání na vzduchu sledována.



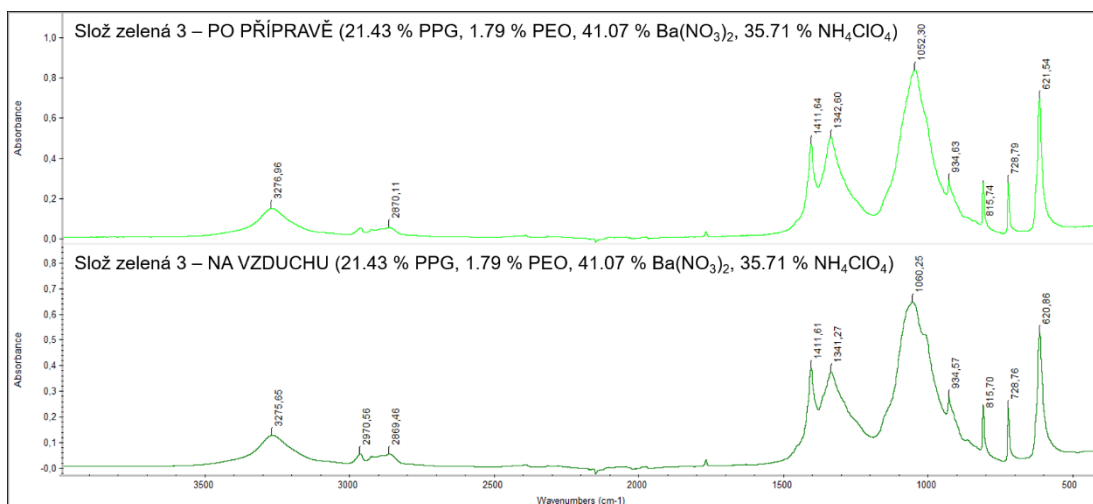
**Obr. 4.15** Infračervené spektrum červené slože 1 (1Č) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 2 týdny po namíchání při ponechání na vzduchu (dole).



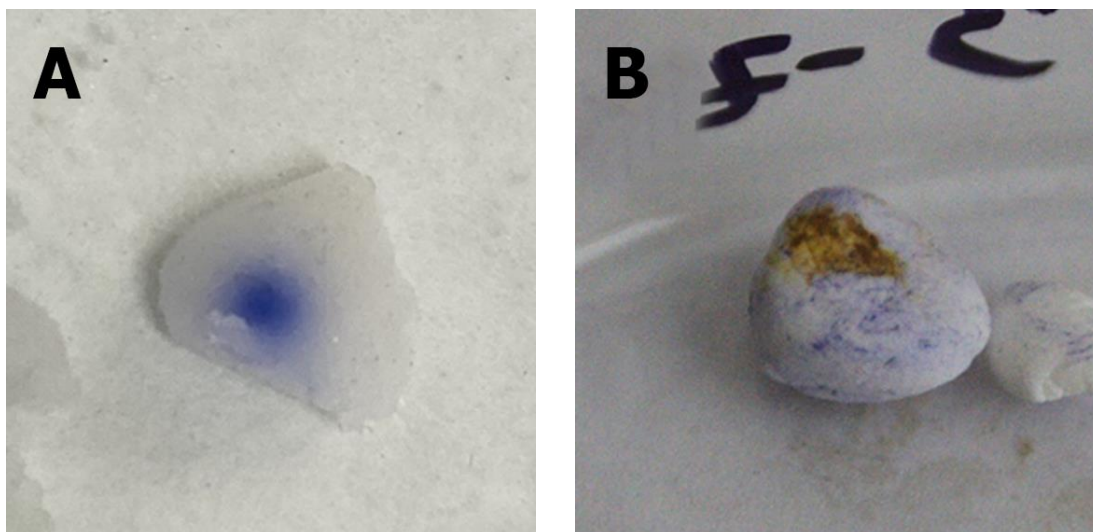
**Obr. 4.16** Infračervené spektrum červené slože 3 (3Č) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 2 týdny po namíchání při ponechání na vzduchu (dole).



**Obr. 4.17** Infračervené spektrum zelené slož 1 (1Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 2 týdny po namíchání při ponechání na vzduchu (dole).



**Obr. 4.18** Infračervené spektrum zelené slož 3 (3Z) bezprostředně po jejím namíchání (nahore) a 2 týdny po namíchání při ponechání na vzduchu (dole).



**Obr. 4.19** Znečištěná část vzorku slož pro červenou barvu plamene (A) a vzorku pro zelenou barvu plamene (B) ponechaných na vzduchu. (Foto: Tomáš Kudláček)

### 4.3 Citlivost ke tření

Před měřením se předpokládalo, že slože budou z legislativního hlediska vůči tření necitlivé (tzn. při šesti po sobě jdoucích zkouškách s třecí silou 360 N nebude mít v žádném případě jakoukoliv odezvu). Následné stanovení citlivosti ke tření však tuto hypotézu vyvrátilo. Proto bylo nutné provést přesná stanovení citlivosti ke tření, která byla časově náročná. Citlivost ke tření tak byla stanovena jen u červeně hořících složí **1Č**, **3Č** a **4Č**, zeleně hořících **1Z**, **3Z** a **7Z** a modře hořících **1M**, **3M** a **7M**.

Tabulka níže shrnuje citlivosti ke tření pro 50% pravděpodobnost iniciace pro výše uvedené slože:

**Tab. 4.1** Citlivost ke tření [N] pro 50% pravděpodobnost iniciace u složí 1Č, 3Č, 4Č, 1Z, 3Z, 7Z, 1M, 3M a 7M.

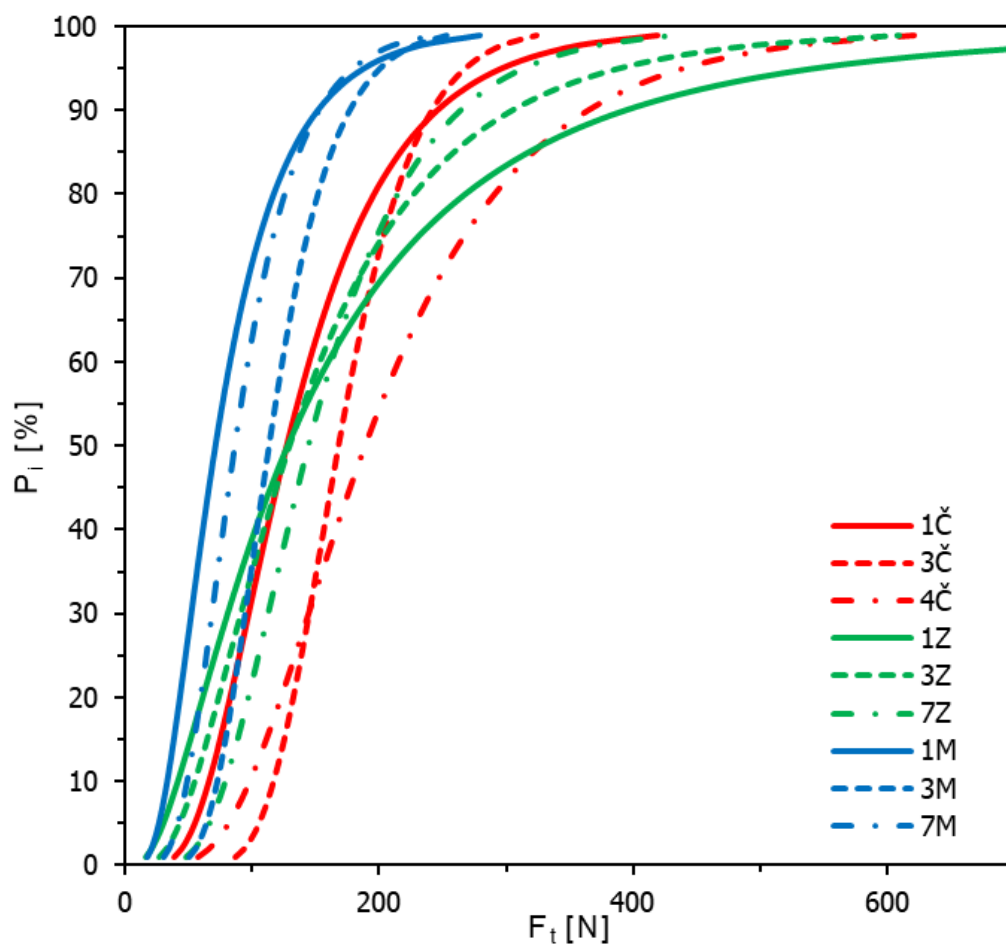
	1Č	3Č	4Č	1Z	3Z	7Z	1M	3M	7M
Citlivost ke tření pro 50% $P_i$ [N]	127	169	189	128	130	145	72	114	87

Existuje předpoklad, že čím více pojiva (polypropylenglykolu) slož obsahuje, tím méně je citlivá ke tření. To se potvrdilo v případě modře hořících složí (viz Tab. 4.1). Tento předpoklad se zcela nepotvrdil u červeně a zeleně hořících složí, kde jsou nejméně citlivé slože optimální (4Č, 7Z) přestože obsahují o zhruba 7 % méně polypropylenglykolu než slože 3Č a 7Z.

Při tření dochází u složí k projevu iniciace pouze v podobě slabého lupání, praskání, popř. při velké třecí síle (>180 N) zůstane v případě modře hořících složí na zkušební porcelánové destičce hnědá až černá stopa. Pozitivní odezva při jednom cyklu pohybu porcelánového kolíku po destičce nastala několikrát za sebou. To znamená, že tření způsobí lokální iniciace v rámci vzorku, nikoliv však iniciaci celého vzorku najednou. Slože jsou tedy citlivé, ale projevy iniciace jsou mírné – slože při tření viditelně nehoří ani nedýmí.

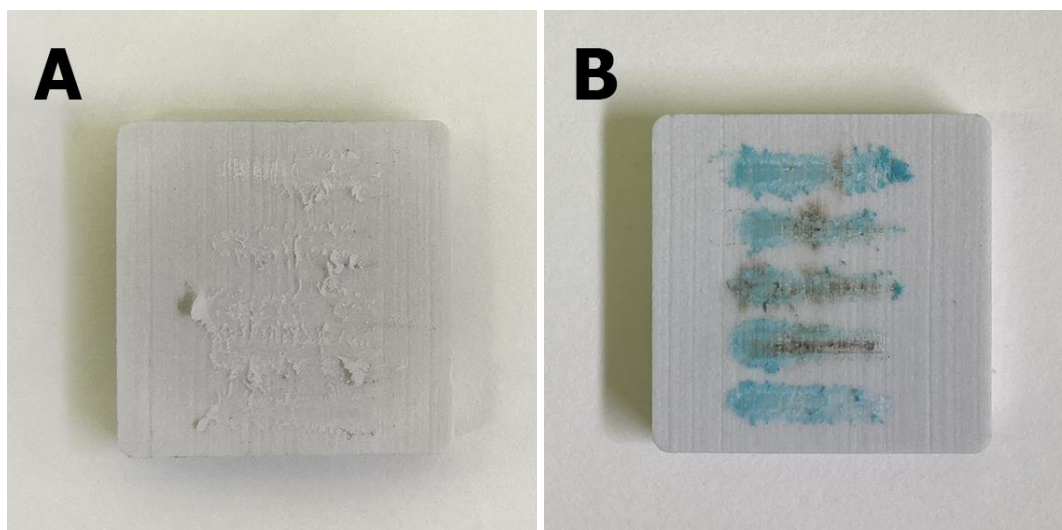
Nejvíce citlivé ke tření byly modře hořící slože (viz Obr. 4.20), což je pravděpodobně způsobeno vysokým podílem chloristanu amonného, který zde tvoří polovinu slože. Sám o sobě je totiž velmi citlivý vůči vnějším mechanickým podnětům.

## Porovnání citlivosti ke tření všech složí



**Obr. 4.20** Porovnání citlivosti ke tření vybraných červeně (1Č, 3Č, 4Č), zeleně (1Z, 3Z, 7Z) a modře (1M, 3M, 7M) hořících složí.

Slože pro modrou barvu plamene zároveň měly nejvýraznější projevy iniciace – jednak zvukové (velmi silné lupání a praskání) a jednak stopy na zkušební destičce (viz Obr. 4.21). Modře hořící slože po iniciaci při zkoušce ke tření jako jediné zanechaly na porcelánové destičce hnědou/černou stopu (viz Obr. 4.21), což je nejspíš způsobeno velkým podílem chloristanu amonného na celkovém složení.

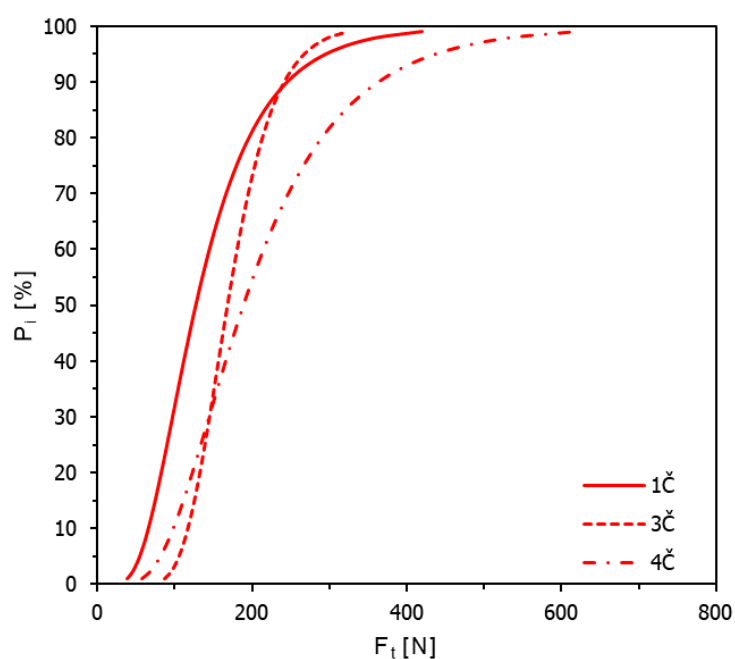


**Obr. 4.21** Porovnání stop na destičce po zkouškách citlivosti vůči tření červeně/zeleně hořících složí (A) a modře hořících složí (B). (Foto: Tomáš Kudláček)

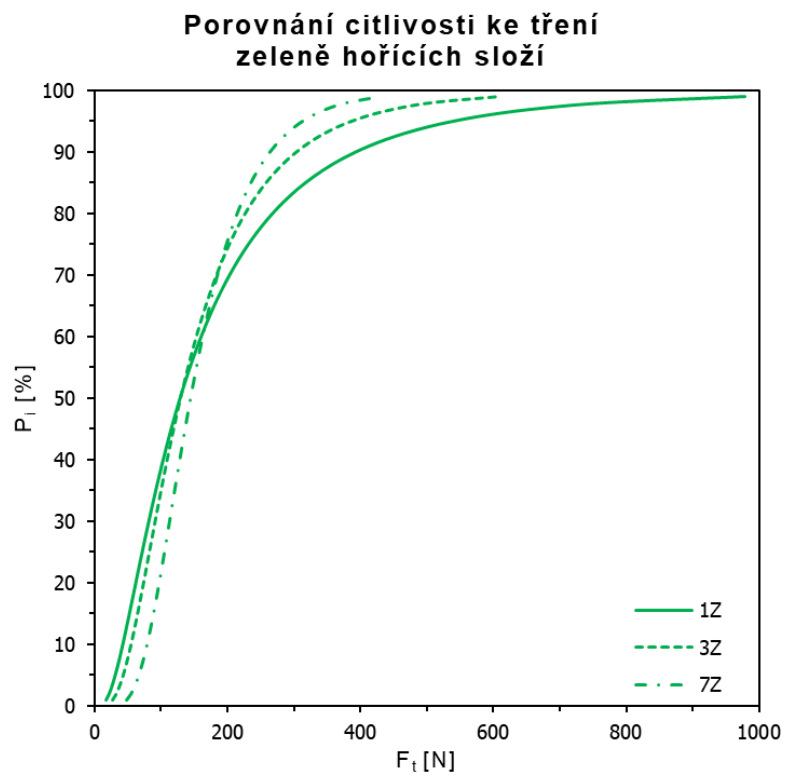
Optimální slož 7M se svou citlivostí ke tření blíží citlivosti ke tření 2,2-bis[[nitrooxy)methyl]propan-1,3-diyl-dinitrátu (Pentritu). Pentrit je individuální látka s citlivostí ke tření 40–80 N, která je v případě porovnávání citlivostí ke tření považována za hraniční případ manipulačně bezpečné trhaviny. Projevy iniciace modře hořících složí byly však během měření diametrálně odlišné od projevů Pentritu.

Celé citlivostní křivky daných složí pro jednotlivé barvy jsou uvedeny na Obr. 4.22, Obr. 4.23 a Obr. 4.24 níže:

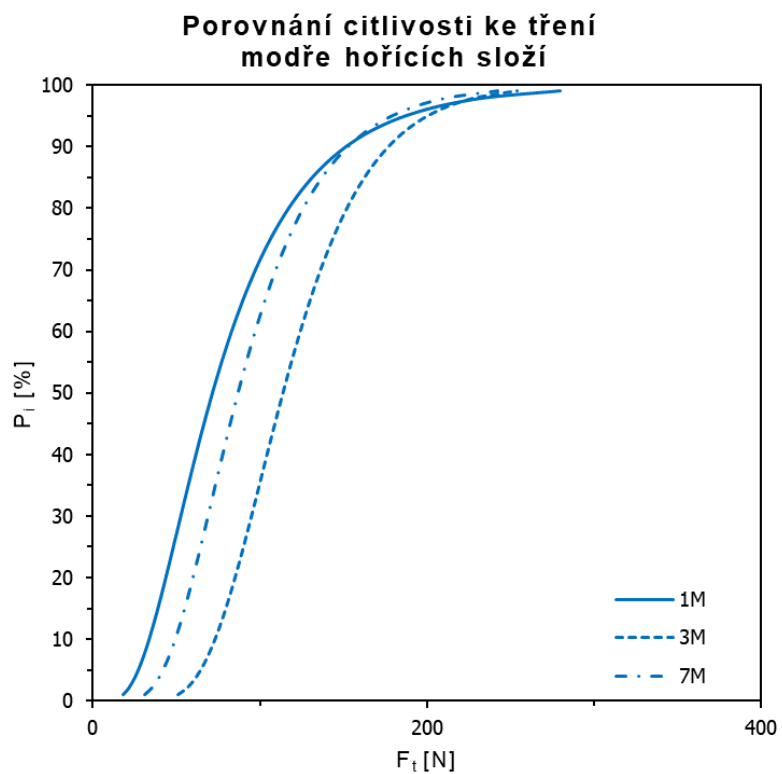
#### Porovnání citlivosti ke tření červeně hořících složí



**Obr. 4.22** Citlivostní křivky vybraných červeně hořících složí (1Č; 3Č; 4Č).



**Obr. 4.23** Citlivostní křivky vybraných zeleně hořících složí (1Z; 3Z; 7Z).



**Obr. 4.24** Citlivostní křivky vybraných modře hořících složí (1M; 3M; 7M).

## 5 ZÁVĚR

V rámci předložené práce bylo připraveno celkem 18 pyrotechnických složí – 4 pro červenou barvu plamene, 7 pro zelenou a taktéž 7 pro modrou. Slože byly připravovány z polypropylenglykolu (palivo, pojivo), polyethylenoxidu (palivo), chloristanu amonného (oxidovadlo) a dusičnanu strontnatého, dusičnanu barnatého, nebo dusičnanu měďnatého bazického (oxidovadlo a složka barvicí plamen pro příslušnou barvu plamene).

Slože byly nejdříve připraveny podle původního poměru uvedených látek, jehož autorem je Mgr. Radovan Skácel, Ph.D. Původní složení bylo dále upravováno za účelem dosažení optimální plasticity, minimální adheze, jednoznačné a čisté barvy plamene. Dále byla u složí pomocí IR spektroskopie sledována chemická stálost v průběhu několika týdnů. Měřena byla i citlivost vůči tření.

Ze všech připravených složí byly nakonec vybrány ty, které mají optimální vlastnosti (tzn. dobrá plasticita, dělitelnost a tvarovatelnost rukou, minimální adheze vůči laboratorním pomůckám a latexovým rukavicím, jednoznačná a čistá barva plamene) pro použití bezprostředně po přípravě.

Pro červenou barvu plamene byla jako optimální vybrána slož, kterou tvořilo 14 % polypropylenglykolu, 43 % dusičnanu strontnatého a 43 % chloristanu amonného (polyethylenoxid nebyl v této složi použit). V rámci práce je tato slož označena jako slož 4Č. Slož je s 50% pravděpodobností iniciace citlivá ke tření při 189 N.

Ze zeleně hořících složí byla jako optimální vybrána slož 7Z tvořená 14 % polypropylenglykolu, 46 % dusičnanu barnatého a 40 % chloristanu amonného (polyethylenoxid opět nebyl použit). Citlivost slože ke tření pro 50% pravděpodobnost iniciace je 145 N.

Pro modrou barvu plamene byla jako optimální vybrána slož 7M, která se skládala ze 17 % polypropylenglykolu, 33 % bazického dusičnanu měďnatého a 50 % chloristanu amonného. Tato slož je v 50 % případech citlivá ke tření při 87 N. Slože pro modrou barvu plamene byly obecně nejvíce citlivé vůči tření ze všech připravovaných složí.

Projevy iniciace při zkouškách ke tření byly u zmíněných složí mírné. Nejvýraznějším projevem bylo slabé zadýmení nebo praskání. Tato praskání se při zkouškách ozývala v rámci jednoho vzorku opakovaně. Slože se tak zdají být vůči

tření citlivé pouze lokálně, avšak nelze zaručit, že při tření nenastane iniciace celého vzorku. Během zkoušky slože nikdy nezahořely.

U připravených složí se bohužel nepotvrdil předpoklad, že se jedná o zcela necitlivé směsi, které by bylo možné považovat za naprosto bezpečnou variantu pyrotechnických složí. Při dodržení bezpečnostních zásad pro práci s citlivými látkami lze prohlásit, že se jedná o bezpečnější alternativu k jiným pyrotechnickým složím například s chlorečnanem nebo s kovovými palivy.

Měření na FTIR a porovnáním infračervených spekter bylo zjištěno, že výše uvedené slože byly při skladování v těsně uzavřené nádobě za běžných laboratorních podmínek stabilní minimálně po dobu 5 týdnů.

V rámci práce se podařilo naplnit všechny vytyčené cíle. Byly nalezeny poměry látek pro přípravu složí, které poskytují optimální konzistenci a jednoznačnou barvu plamene. U těchto složí byla stanovena citlivost vůči tření pro 50% pravděpodobnost iniciace a byla zjištěna doba a podmínky skladování, po kterou jsou dostatečně chemicky stabilní. Návod na přípravu složí s optimálními vlastnostmi je k práci přiložen jako Příloha IV. Kromě toho byla citlivost ke tření a chemická stabilita zjištěna u složí připravených podle původních poměrů látek od Mgr. Radovana Skácela, Ph.D. a u složí s obsahem pojiva (polypropylenglykolu) vyšším než 20 %.

**Při přípravě složí, kterými se tato práce zabývala, a následné manipulaci s nimi je nutné, aby byly dodrženy zásady bezpečnosti práce v laboratoři a aby byly použity ochranné pomůcky (brýle/obličejový štít, ochrana sluchu, rukavice)! Zvýšená opatrnost je vyžadována jak při přípravě, tak i při manipulaci s výslednou složí! Slože není možné vystavovat rizikovým podnětům, jako především plamenu, tření, nárazu nebo výboji elektrostatické jiskry. Slože by měla připravovat a dále s nimi zacházet pouze náležitě proškolená osoba.**

## 6 LITERATURA

- [1] MATOUŠEK, Pavel. (2013): *Potenciál zneužití výrobků civilní pyrotechniky*. Brno, 2013. [Online]. [cit. 2021-08-22]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Ing. Ondřej NĚMČÁK, Ph.D.  
Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=63339](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=63339)
- [2] WIKIPEDIE: Otevřená encyklopedie: *Pyrotechnika* [Online]. [cit. 2021-08-22].  
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Pyrotechnika&oldid=20629828>
- [3] ŠIDLOVSKIJ, Alexandr A. (1957): *Základy pyrotechniky*. Praha. Naše vojsko, 1957.
- [4] ELLERN, Herbert (1968): *Military and Civilian Pyrotechnics*. New York. Chemical Publishing Company, Inc.
- [5] CONKLING, John (1985): *Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory*. První vydání. New York. Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-7443-4.
- [6] SHIMIZU, Takeo (1981): *Fireworks: Art, Science and Technique*, Třetí vydání. Austin, Texas. Pyrotechnica Publications. ISBN 0-929388-05-4.
- [7] SKOOG, Douglas A.; WEST, Donald M.; HOOLLER, James F.; CROUCH, Stanley R. (2019): *Analytická chemie*. První vydání. Praha: VŠCHT v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-043-0.
- [8] VŠCHT.CZ: *Infračervená spektroskopie*. [Online]. [cit. 2022-01-04].  
Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm>
- [9] VŠCHT.CZ: *Reflektanční techniky*. [Online]. [cit. 2022-01-04].  
Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/IR/Atr.htm>
- [10] ČESKÁ REPUBLIKA, Ministerstvo životního prostředí (2004): *Vyhláška č. 222/2004 Sb.* [Online]. [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2004-222>
- [11] osobní konzultace
- [12] ŠELEŠOVSKÝ, Jakub, PELIKÁN Vojtěch, SCHUSTER Jaroslav, JANOVSÝ Břetislav, MATYÁŠ Robert (2020): *FEST – New procedure for evaluation of sensitivity experiments*. Propellants Explos. Pyrotech. 2020, 45, 1813-1818.

