



Středoškolská technika 2023

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Výzkum nových moderátorů hoření pro modelářské raketové motory na TPH

Petr Zelinka

Gymnázium, Pardubice, Mozartova 449

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 3: Chemie

Výzkum nových moderátorů hoření pro modelářské raketové motory na TPH

**Petr Zelinka
Pardubický kraj**

Pardubice 2023

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 3: Chemie

Výzkum nových moderátorů hoření pro modelářské raketové motory na TPH

Research of new combustion moderators for solid-propellant model rocket motors

Autor: Petr Zelinka

Škola: Gymnázium, Pardubice, Mozartova 449, Mozartova 449,
530 09 Pardubice

Kraj: Pardubický kraj

Konzultanti: Ing. Jan Zigmund, PhD., Mgr. Alexandr Prokop

Pardubice 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Pardubicích dne 27. 3. 2023

.....
Petr Zelinka

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat mému konzultantovi Mgr. Alexandru Prokopovi za poskytnutí výborně vybaveného zázemí, konzultací, konzultantů a finančních prostředků v rámci Talent centra Technecium 4.0 zaštiťované občanským sdružením Uskupení Tesla.

Dále bych chtěl poděkovat mému druhému konzultantovi Ing. Janu Zigmundovi, PhD. za pomoc při praktické části a za konzultace.

V neposlední řadě patří mé poděkování celé mé rodině a mým kamarádům z gymnázia, základní školy a orchestrů za podporu při práci.

Anotace

Tato práce se zabývá otázkou, zda-li je možné pomocí moderátorů (příměsí do tuhé pohonné hmoty = TPH) vylepšit provozní parametry propelentu na bázi KNO_3 a sorbitolu. Nejdříve bylo vybráno 5 z celkem 17 testovaných palivových kompozic. Ty byly poté připraveny metodou tavení propelentu v dutince a lití za pomoci ztekucovadla SLES (Laurethsulfát sodný). Také byla připravena kompozice bez moderátoru jako referenční. Propelent byl plněn do papírových dutinek pro malé modelářské raketové motory. Reálný specifický impuls byl asi třetinový oproti teoretickému. U litého propelentu SX-81 je podezření, že SLES může fungovat jako retardér (zpomalovač) hoření. U motorů s taveným propelentem v dutince byly největší zlepšení u kompozic SX-81 a s moderátorem Fe_2O_3 (2 % nad 100 %) – více jak 24% zlepšení. U litých propelentů nebylo pozorováno významné zlepšení oproti standardu.

Klíčová slova

raketový motor; TPH; propelent; moderátory; raketové modelářství

Annotation

This work deals with the concerns whether it is possible to improve the operating parameters of a propellant based on KNO_3 and sorbitol using moderators (additives to solid propellant). First, 5 out of a total of 17 tested fuel compositions were selected. These were then prepared by two methods – melting the propellant in a paper tube and casting with the help of SLES (Sodium Laureth Sulfate). A composition without a moderator was also prepared as a referential. The propellant was filled into the paper tubes for small model rocket motors. The real specific impulse was about a third compared to the theoretical one. For the SX-81 cast propellant, it is suspected that SLES may act as a flame retardant. For motors with molten propellant in the paper tube, the greatest improvements were observed at SX-81 compositions and composition with Fe_2O_3 moderator (2 % over 100 %) – more than 24 %. No significant improvements were observed for cast propellants compared to the standard.

Keywords

rocket motor; solid propellant; moderators; amateur rocketry

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Teorie.....	8
2.1	Konstrukce motoru.....	8
2.2	Charakteristika použité TPH.....	12
2.3	Charakteristika moderátorů.....	17
3	Metodika.....	20
3.1	Výběr moderátorů.....	20
3.1.1	Příprava vzorků.....	20
3.1.2	Experimenty.....	21
3.1.3	Zpracování dat.....	24
3.1.4	Vyhodnocení.....	27
3.2	Výroba motorů.....	28
3.2.1	Výběr spalovací komory a výroba trysek.....	28
3.2.2	Evidence a příprava motorů.....	30
3.2.3	Výroba a plnění propelentu.....	32
3.2.4	Lití propelentu.....	34
3.2.5	Tavení propelentu v dutince.....	38
3.2.6	Finalizace motorů.....	42
4	Sběr dat, zpracování dat a prezentace výsledků.....	44
4.1	Sběr dat.....	44
4.1.1	Příprava zážehů.....	44
4.1.2	Popis použitého měřiče tahu.....	45
4.1.3	Měření tahu.....	46
4.1.4	Stahování dat z REDALSu.....	47
4.2	Zpracování dat.....	48
4.3	Prezentace výsledků.....	51
5	Závěr.....	57
6	Diskuze výsledků a návrh budoucích experimentů.....	59
7	Použitá literatura.....	60
8	Seznam obrázků a tabulek.....	64
8.1	Seznam obrázků.....	64
8.2	Seznam tabulek.....	67

1 ÚVOD

Raketové motory na tuhé pohonné hmoty (dále TPH) se využívají v mnoha odvětvích. Nejvýznamnější jsou kosmonautika (v orbitálních raketách), výzkum (v sondážních raketách) a obrana (v řízených střelách).

V kosmonautice se motory používají buď jako hlavní motory pro rakety transportující lehký náklad (Scout, Start-1 či Vega), nebo jako přídavné motory pro rakety určené pro větší a těžší náklad (Raketoplán a SLS). V obraně se motory na TPH používají hlavně v balistických střelách (LGM-118 Peacekeeper a RT-2PM Topol). Sondážní rakety slouží k provádění měření a experimentů při suborbitálním letu (Astrobee a Black Brant). Většina využívá motory na TPH. [1]

Všechna tato odvětví jsou důležitá pro zachování a rozšiřování vědomostí lidstva. Pro výchovu odborníků pro tyto účely v oblasti raketových motorů je zapotřebí vhodná motivace a start. Tím může být raketové modelářství. Zde se může běžný člověk poprvé začít zajímat o rakety a raketové motory a v budoucnu, díky předešlým zkušenostem z onoho modelářství, může na raketových motorech postavit svoji životní kariéru.

Raketové modelářství je činnost, která se zabývá stavbou a provozováním modelů raket, raketových kluzáků a stavbou maket skutečných raket. Jedná se o koníček rozvíjející jak vědomosti jedince v oblastech technických věd (matematiky, fyziky – aerodynamiky, elektroniky atd. a chemie), tak i jeho trpělivost, manuální zručnost, analytické myšlení a schopnost týmové práce.

Atraktivní formou umožňuje zájemcům osvojit si znalosti a pracovní postupy při návrhu, zhotovování a testování výrobků. Při současných technologických možnostech může být na modelech prováděna celá řada fyzikálních měření a experimentů. Cyklus návrh – vývoj – výroba – experiment – zpracování dat – vyhodnocení je díky současným technologickým možnostem velmi rychlý.

Rozkvět této volnočasové aktivity se pojí s vypuštěním družice Sputnik, tj. na přelomu 50. a 60. let 20. století. Pro podporu tohoto nového koníčku vznikaly různé organizace. V USA to byla například Pacific Rocket Society. V tehdejší Československu fungoval klub raketových modelářů Svazarmu (Svazarm = Svaz pro spolupráci s armádou). V současnosti je klub raketových modelářů součástí Svazu modelářů ČR. [2]

V 60. až 70. letech 20. stol. v Československu byly na trhu motory vyráběné v ZVS (Závody všeobecného strojířství) Dubnica nad Váhom. [3]

Po Sametové revoluci v roce 1998 výrobu raketových motorů převzala firma Rapier. [4] V současnosti jsou na trhu dostupné motory firem Estes (USA) a Klima (Německo, pravděpodobně největší současný výrobce raketových motorů v Evropě).

V modelářských raketových motorech se jako TPH používá černý prach, TPH na bázi chloristanu amonného (NH_4ClO_4 , typické pro motory s vysokým výkonem) [5] nebo

tzv. rocket candy (TPH využívající jakožto palivo cukr). [6] Konkrétně jako palivo do rocket candy byla nejdříve používána sacharóza. Později byla sacharóza vystřídána sorbitolem (tzv. alkoholový cukr). Sorbitol má na rozdíl od alternativ nižší teplotu tání a prakticky nekaramelizuje. [7] Jakožto oxidační činidlo se v sorbitolové TPH využívá nejčastěji KNO_3 (dusičnan draselný). Typický poměr KNO_3 a sorbitolu je 65 : 35. TPH na bázi KNO_3 a sorbitolu budu dále v práci označovat zkratkou KNSB.

Výhod KNSB je hned několik: oproti černému prachu větší specifický impulz (zhruba o 60 %) [1], nižší pořizovací náklady, jednodušší postup přípravy a oproti chloristanovým TPH větší bezpečnost při práci. [8]. Z těchto důvod může být KNSB vhodná pro aplikaci v raketovém modelářství, hlavně pro zapálené nováčky.

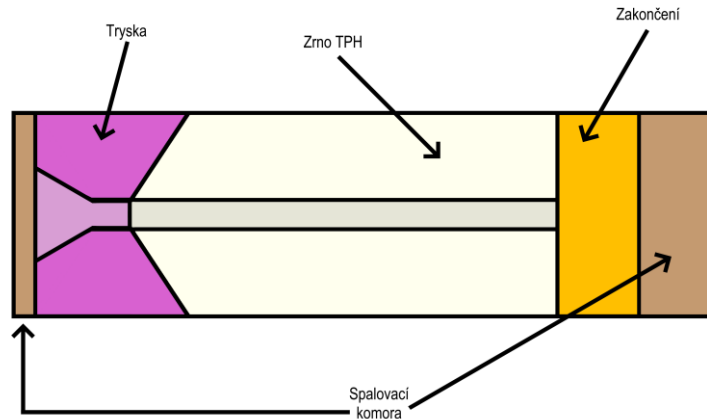
Díky tzv. moderátorům hoření se dají provozní parametry TPH vylepšovat. Moderátor hoření je složka TPH, která snižuje nebo zvyšuje rychlost hoření. Nejčastějšími moderátory jsou kovy, jejich oxidy (například Fe_2O_3 , nebo CuO) nebo jiné sloučeniny některých kovů. [9] Tato práce si dává za cíl ověřit hypotézu, jestli je možné s pomocí moderátorů hoření vylepšit provozní parametry propelentu KNSB.

Tato práce navazuje na výzkum moderátorů hoření TPH prováděný v ÚEnM UPa (Ústav energetických materiálů Univerzity Pardubice).

2 TEORIE

2.1 Konstrukce motoru

Modelářský raketový motor má jednoduchou konstrukci. Základními částmi jsou: spalovací komora, tryska, zrno TPH a zakončení. Součástí motorů bývá i zpožďovací slož a výmet.

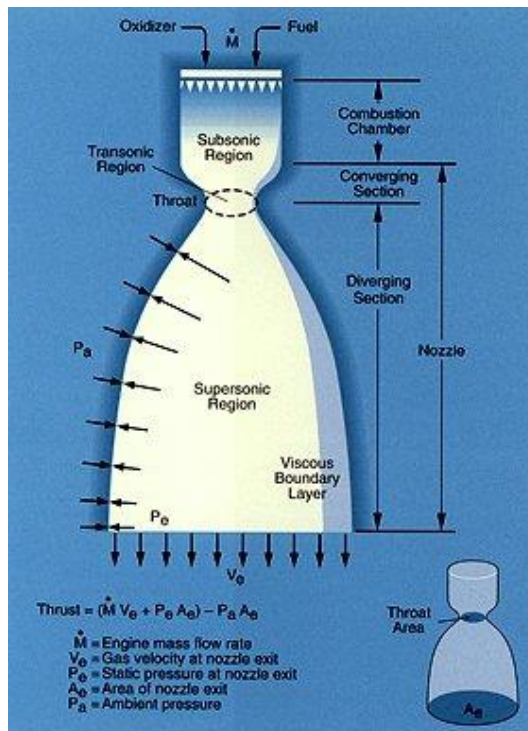


Obr. 1: Podélný řez modelářského motoru na TPH s popisem

Ve spalovací komoře je vloženo, vlepeno nebo vlisováno zrno TPH. Komory malých modelářských motorů jsou obvykle vyrobeny z papírových dutinek. Několik typů motorů má spalovací komoru kovovou.

Komora musí při odhořívání paliva odolávat vysoké teplotě a tlaku, proto je TPH vkládána ve formě tzv. batesů. Jsou to zrna propelentů pokrytá na svém povrchu izolací – tzv. linerem, který komoru chrání před působením horkých zplodin hoření. [1] [10] [11]

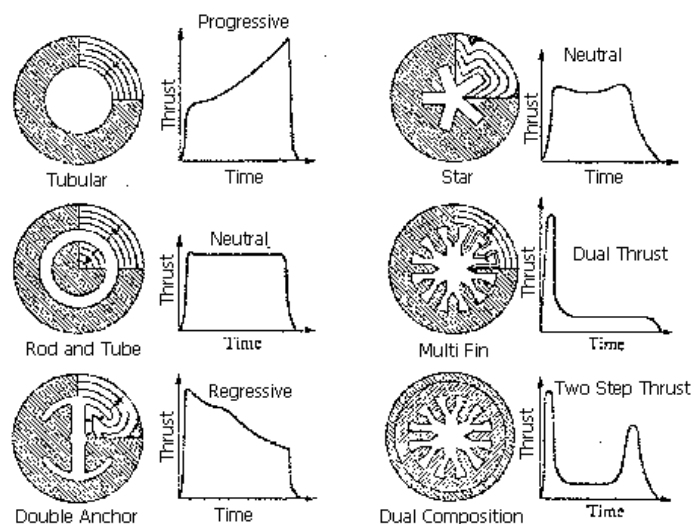
V trysce jsou zplodiny hoření propelentu urychlovány a dochází tak k přeměně jejich tepelné energie na energii kinetickou. Ve vstupní části trysky tvaru zužujícího se (konvergentního) kužele je rychlost zplodin hoření podzvuková (subsonická), číslo Macha $M < 1$. V kritickém (nejmenším) průřezu trysky dosahují zplodiny hoření rychlosti zvuku ($M = 1$). Odsud se tryska rozšiřuje (divergentní část) až na takový průměr, kdy se tlak zplodin hoření vyrovná s tlakem okolního prostředí. Zplodiny vytékají z trysky vysokou rychlostí.



Obr. 2: Schéma trysky raketového motoru [12]

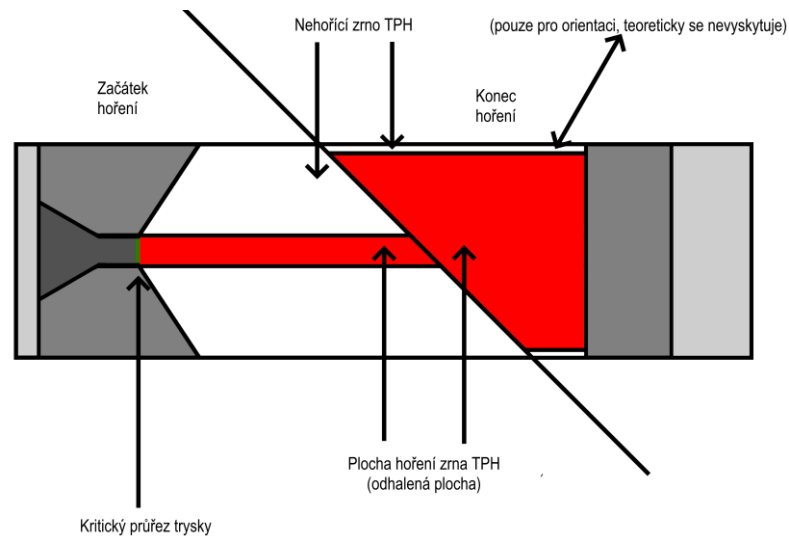
Tryska je při hoření motoru tepelně i mechanicky namáhána. Proto se zhotovují z vhodného materiálu, například grafitu. [13]

Zrno TPH ve spalovací komoře může mít různé geometrické tvary, které určují průběh hoření (průběh tahu v závislosti na čase). Pro tuto práci byla zvolena běžná geometrie válcového zrna s centrálním kanálem kruhového průřezu (na Obrázku 3 označená „tubular“).



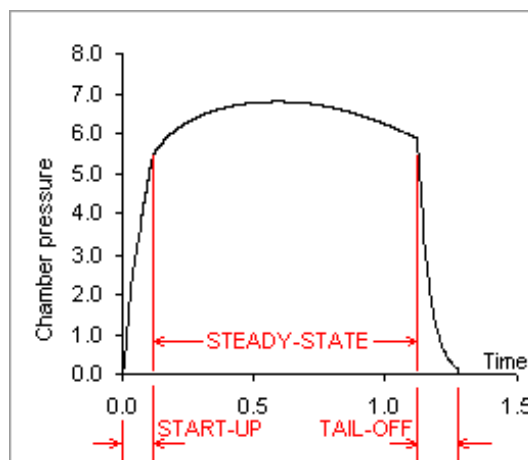
Obr. 3: Tvary kanálů u zrna TPH a jejich vliv na průběh hoření [14]

Důležitým parametrem motorů na TPH je tzv. zahrazení. Zahrazení je poměr hořícího povrchu zrna ke kritickému průřezu trysky. [15]



Obr. 4: Podélný řez motoru s vyznačením ploch pro výpočet zahrazení

Zahrazení lze využít pro odhad tlaku ve spalovací komoře. Změnu tlaku ve spalovací komoře lze rozdělit do tří fází: zážeh, ustálené hoření a výplach.



Obr. 5: Závislost tlaku v motoru na čase [15]

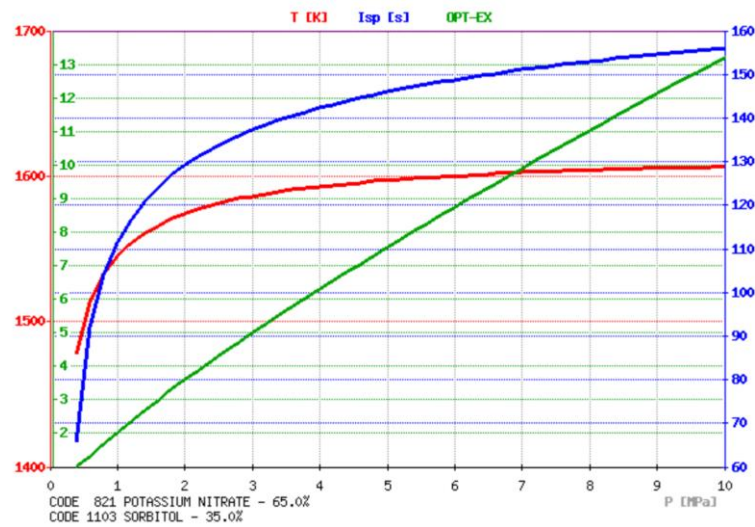
Tlak v stabilním stavu lze vypočítat pomocí rovnice (1)

$$p = K * \rho * r * v, \quad (1)$$

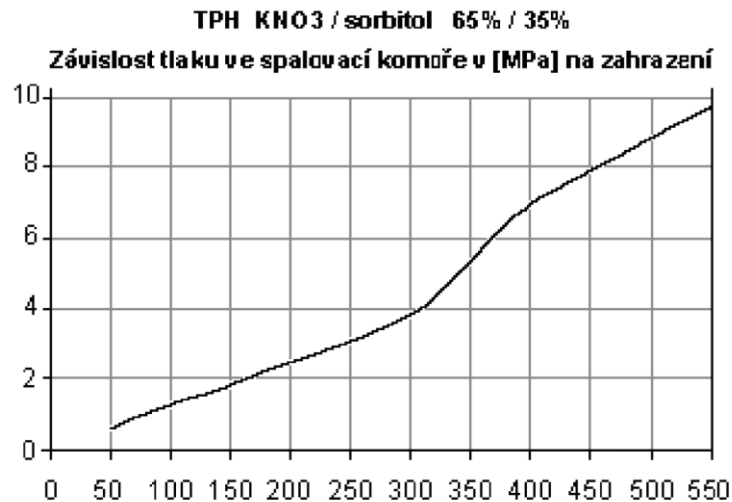
kde:

- K – zahrazení
- ρ – hustotu propelentu
- r – rychlost hoření
- v – výtoková rychlost spalin. [16]

Tlak ve spalovací komoře má vliv na provozní parametry motoru:



Obr. 6: Závislost specifického impulsu a teploty na tlaku ve spalovací komoře [17]

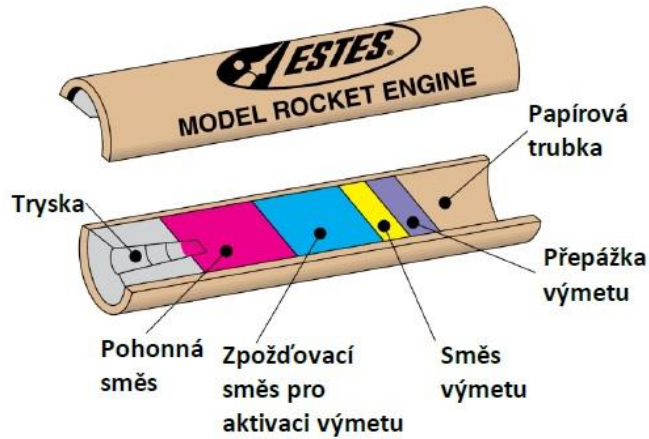


Obr. 7: Závislost tlaku ve spalovací komoře na zahrazení pro propelent KNSB [17]

Obrázky 6 a 7 spolu souvisí. Jestliže chceme navrhnout spolehlivě fungující motor, je potřeba zvolit vhodné zahrazení. Příliš malé zahrazení u KNSB způsobuje tzv. kašláni motoru (pulzaci). Při větších zahrazeních musí mít spalovací komora dostatečnou pevnost, aby odolala vysokým tlakům.

Z Obrázku 6 vyplývá, že s rostoucím tlakem se specifický impuls zvyšuje jen pozvolna. Autor doporučuje pro motory s KNSB zahrazení větší než 100 (to odpovídá tlaku >1 MPa). [17]

Podle určení jsou modelářské raketové motory obvykle uzavřeny zpoždovací složí, výmetnou složí a víčkem. Zpoždovací slož odhořívá, když raketa stoupá do vrcholu dráhy. Potom se aktivuje výmet padáku.



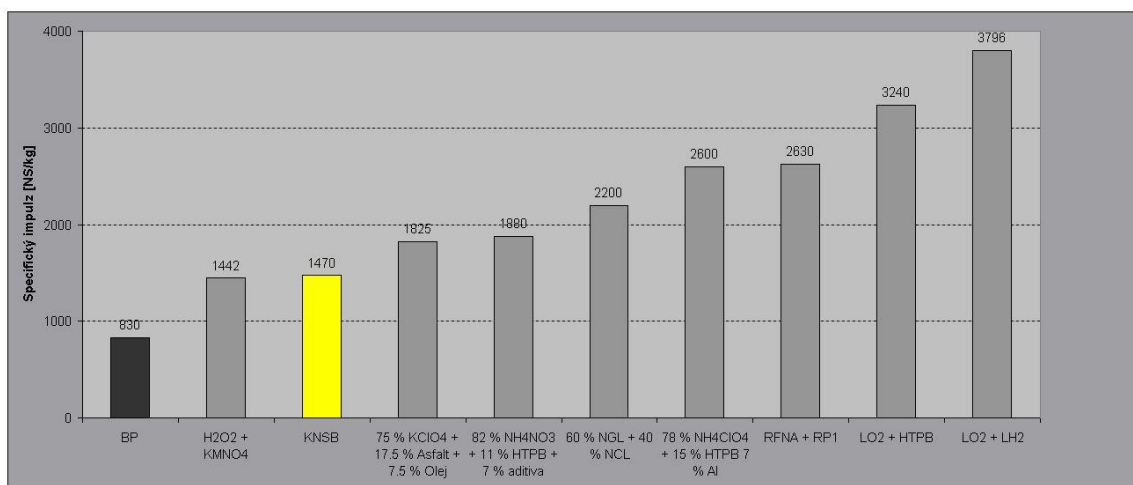
Obr. 8: Podélný řez motoru se zpoždovací složí a výmetem [18]

Některé motory ale výmet ani zpoždovací slož nepoužívají, jsou jen „zavíčkované“. Jedná se motory pro raketová letadla nebo auta, například od firem TSP a Rapier. [18] [19] [20]

Pro účely této práce byly připraveny motory bez zpoždovací slože a bez výmetu. Byly jen zavíčkovány polymerním lepidlem.

2.2 Charakteristika použité TPH

Různé TPH mají různé specifické impulzy. Viz připojený Obrázek 9.



Obr. 9: Porovnání propelentů a jejich specifických impulzů [51]

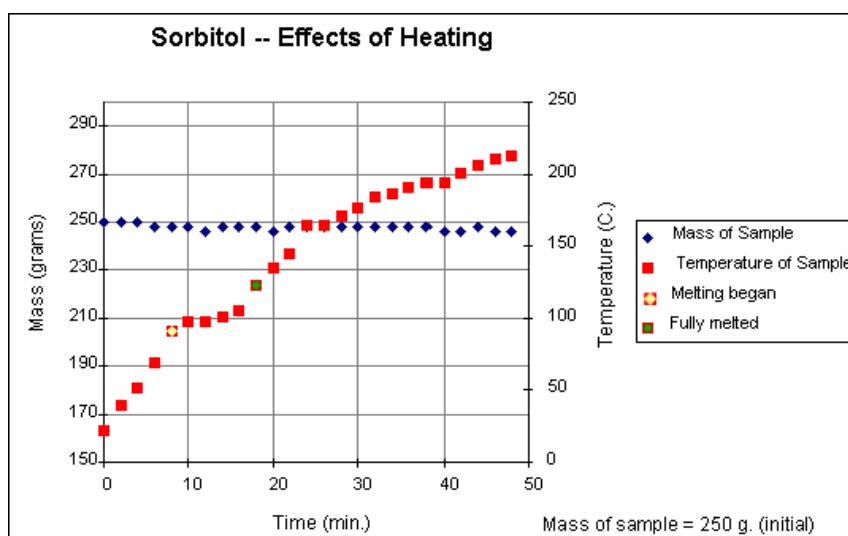
TPH, kterou jsem se rozhodl použít, je složena ze sorbitolu a dusičnanu draselného v poměru 35 : 65. Oproti černému prachu má dle Obrázku 9 větší I_{sp} .

Tab. 1: Základní vlastnosti paliva a oxidovadla

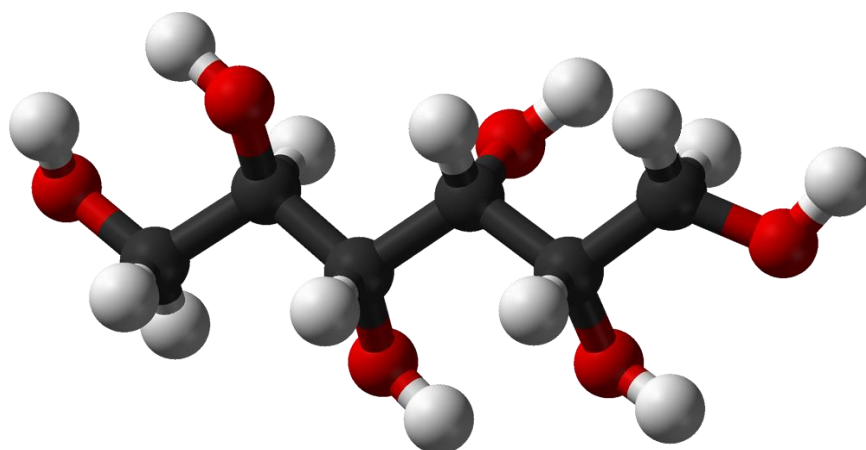
Název	Vzorec	Označení	CAS	M [g/mol]	t_i [°C]	t_v [°C]	ρ [g/cm ³]	Zdroj
Dusičnan draselný	KNO ₃	KN	50-70-4	101,103	334	rozklad (400)	2,109	[23]
Sorbitol	C ₆ H ₁₄ O ₆	SB	7757-79-1	182,17	94–96	asi 296	1,49	[21] [22]

Sorbitol je bílá krystalická látka sladké chuti. Bývá označována jako „alkoholový cukr“. Získává se ze škrobu, ale nachází se například v jablkách nebo meruňkách. Využívá se jako náhrada cukru nebo ve zdravotnictví jako laxativum. [21]

Důležitou vlastností sorbitolu pro aplikaci v raketovém modelářství je jeho nízký bod tání a to, že se nerozkládá (tj. nepodléhá karamelizaci). To je způsobeno velikostí jeho molekul a i tím, že klasické cukry se cyklizují. Sorbitol zůstává ve formě řetězce. Sorbitol má ale nevýhodu – v jeho molekule může být navázána voda (ve formě hemihydrátu - ½ H₂O nebo monohydrátu – 1 H₂O). Dle testu Richarda Nakky se dá vázaná voda zahříváním sorbitolu vyvařit. [7]



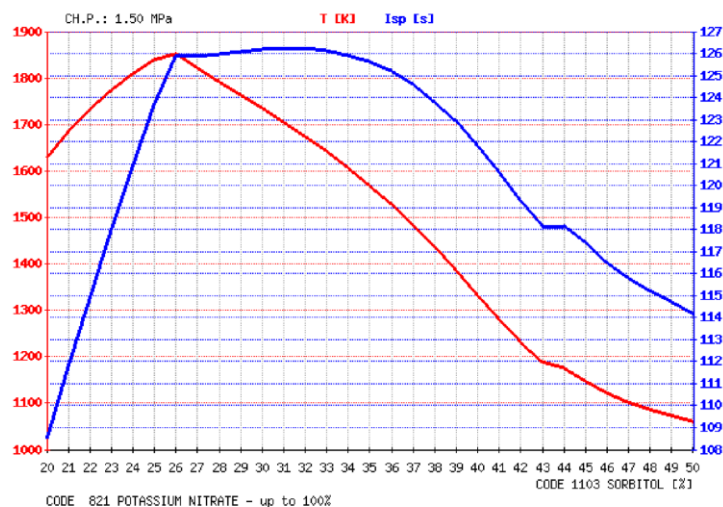
Obr. 10: Vliv působení zvýšené teploty na sorbitol [7]



Obr. 11: Molekula sorbitolu [21]

KNO_3 je bílá krystalická látka. Další označení je například ledek draselný, sanytr aj. Je to draselná sůl kyseliny dusičné. Využívá se jako hnojivo a také je složkou černého prachu. [23] Je to oxidační činidlo. [8]

Poměr oxidačního činidla a paliva významně ovlivňuje specifický impuls. Viz připojený Obrázek 12.



Obr. 12: Závislost specifického impulsu a teploty na poměru sorbitolu a KNO_3 [17]

V bodě s nejvyšší teplotou hoření (poměr paliva a oxidovadla je 26 : 74) je poměr složek přibližně stechiometrický. To znamená, že počet atomů kyslíku, uhlíku a vodíku přesně stačí na vytvoření molekul CO_2 a H_2O . Dochází k dokonalému spalování.

Důvod používání poměru složek 65 : 35 je nízká viskozita tj. vyšší tekutost a snazší zpracování kompozice KNSB propelentu. [17] [24]

Všechny parametry ovlivňující specifický impuls vyjadřuje Saint-Venant Wantzelova rovnice (2)

$$V_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{R_0}{M} T_c \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (2)$$

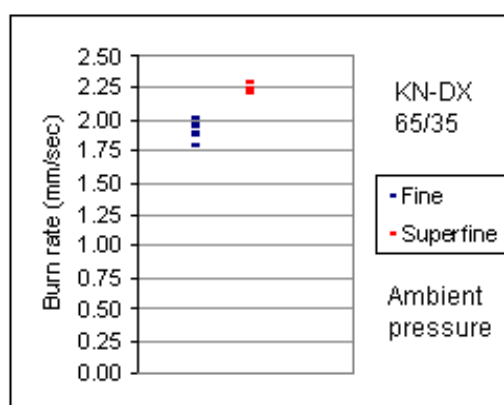
kde:

- V_e – výtoková rychlost splodin hoření z trysky raketového motoru.
- γ – poměr specifických tepel
- R_0 – univerzální plynová konstanta
- M – střední molekulová hmotnost zplodin hoření
- T_c – teplota hoření propelentu
- p_e – tlak plynů na výstupu z trysky
- p_c – tlak ve spalovací komoře motoru. [25]

Specifický impuls je číselně i rozměrově roven výtokové rychlosti zplodin hoření z trysky V_e . [26]

Dalším faktorem ovlivňující rychlost hoření, a tím i specifický impuls, je velikost částic oxidačního činidla. Rozdíly jsou u KNO_3 patrné méně než například u $KClO_4$. Richard Nakka provedl test měření rychlosti hoření KNSB propelentu v závislosti na velikosti částic KNO_3 . V testu byly použity částice o střední velikosti 100 μm a 20 μm . Test byl prováděn za atmosférického tlaku a jako palivo byla použita D-glukóza. Poměr oxidovadla a paliva byl 65 : 35.

Nakka zaznamenal u frakce 20 μm oproti frakci 100 μm rychlost hoření vyšší o 16 %.



Obr. 13: Vliv velikosti částic oxidovadla na rychlosti hoření [9]

Nakka také provedl test výtokové rychlosti spalin motorů s propelentem na bázi KNO_3 a sacharózy v poměru 65 : 35, kde zkoumal efekt velikosti částic oxidovadla (max. 250 μm a 100 μm). Výsledkem bylo zrychlení spalin o 7 % v případě částic o velikosti <100 μm (850 m/s a 911 m/s). [9]

Existují programy pro výpočet důležitých termodynamických vlastností propelentů (například PROPEP). Tyto programy řeší rovnovážné složení zplodin hoření a vypočítávají parametry propelentů, jako jsou teplota hoření, výbuchové teplo, molární hmotnost zplodin, specifický impuls aj. Vypočítávají i chemické složení zplodin hoření ve spalovací komoře, v hrdle a na výstupu z trysky. [27]

Výstup z takového programu může vypadat jako na Obrázku 14.

```

Run using June 1988 Version of PEP,
29 Jan 2023 at 7:29:42.53 am

CODE                                WEIGHT    ΔH    DENS    COMPOSITION
1103 SORBITOL                       35.000  -1776  0.05310  6C 14H 6O
  821 POTASSIUM NITRATE              65.000  -1167  0.07670  1N 30 1K
                                         kcal/kg

THE PROPELLANT DENSITY IS 0.06638 LB/CU-IN OR 1.8373 GM/CC
THE TOTAL PROPELLANT WEIGHT IS 100.0000 GRAMS

NUMBER OF GRAM ATOMS OF EACH ELEMENT PRESENT IN INGREDIENTS
[C] 1.152719  [H] 2.689677  [N] 0.642877  [O] 3.081349  [K] 0.642877

*****CHAMBER RESULTS FOLLOW*****
T(K)  T(F)  P(ATM)  P(PST)  ENTHALPY  ENTROPY  CP/CV  GAS  RT/V
1603.  2426.  69.0    1015.0  -138.01   168.60   1.1362  2.509  27.519

SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL= 10.303  14.722
NUMBER MOLS GAS AND CONDENSED= 2.5090  0.3156
  0.92766 H2O  0.47842 CO  0.41119 H2  0.35856 CO2
  0.32131 N2  0.31563 K2CO3*  0.01105 KHO  0.00041 K
  1.93E-04 NH3  6.13E-05 K2H2O2  3.56E-05 CH4  6.87E-06 H
  5.80E-06 KCN  4.20E-06 CH2O  3.77E-06 CNH  3.44E-06 KH
THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS 35.403

*****EXHAUST RESULTS FOLLOW*****
T(K)  T(F)  P(ATM)  P(PST)  ENTHALPY  ENTROPY  CP/CV  GAS  RT/V
1033.  1400.  1.00    14.70  -165.15   168.60   1.1485  2.497  0.400

SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL= 9.463  13.616
NUMBER MOLS GAS AND CONDENSED= 2.4971  0.3214

      mol      %      Mr
H2O    0.76614   13.80  18.01528
H2     0.57818   1.17   2.01588
CO2    0.51983  22.88  44.0095
K2CO3(s) 0.32141  44.42  138.2055
N2     0.32139   9.00   28.0134
CO     0.31123   8.72   28.0101
CH4    0.0002    0.00   16.04246
NH3    0.00005   0.00   17.03052
KHO    3.66E-05  0.00   56.10564
      2.8184666  99.99

THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS 35.480

*****PERFORMANCE: FROZEN ON FIRST LINE, SHIFTING ON SECOND LINE*****
IMPULSE  IS EX  T*  P*  C*  ISP*  OPT-EX  D-ISP  A*M  EX-T
 [s]     [-]  [K]  [at]  [ft/s]  [s]  [-]  [s·g/cm3]  [in2·s/lb]  [K]
fr 151.6  1.1418  1497  39.77  2974.0  10.13  278.5  0.09109  947
fr 1487.  Ns/kg

sh 153.7  1.1121  1519  40.19  3036.9  114.9  282.3  0.09302  1033
sh 1507.  Ns/kg

```

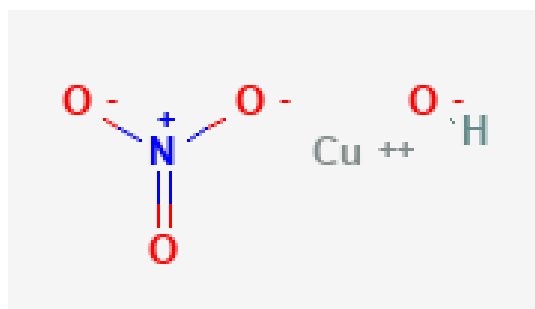
Obr. 14: Ukázka výstupu programu ZPEP (žlutě zvýrazněné důležité údaje – doděláno ručně)

2.3 Charakteristika moderátorů

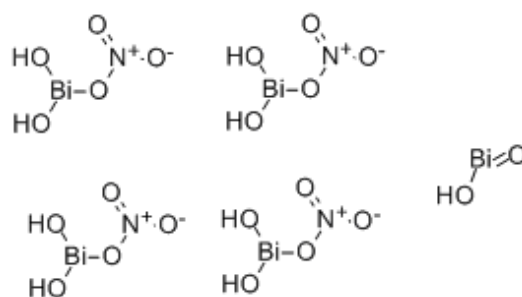
Moderátory slouží k úpravě rychlosti hoření TPH. Vybrané moderátory s jejich základními charakteristikami jsou uvedeny v připojené tabulce. Mohou zlepšit rozklad oxidovadla nebo paliva, zvyšovat rychlost reakcí plynů ve spalovací komoře nebo zvýšit tepelnou vodivost na povrchu zrna TPH. [9]

Tab. 2: Moderátory a jejich značení (*kompozice propelentu → KNO₃ : sorbitol : KClO₄ = 60 : 35 : 5; **složka kompozice SX-81 – vysvětleno později)

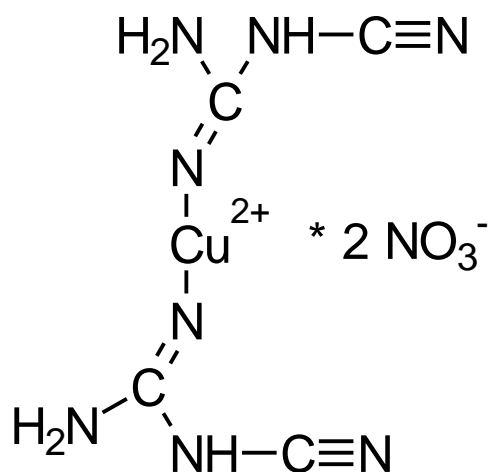
Název	Vzorec	Označení	CAS
Karbid boru	B ₄ C	B4C	12069-32-8
Uhlíkové nanotrubičky	C	Baytubes	308068-56-6
Zásaditý dusičnan měďnatý	CuHNO ₄	BCuN	12158-75-7
Oxid bismutitý	Bi ₂ O ₃	Bi2O3	1304-76-3
Zásaditý dusičnan bismutitý	Bi ₅ H ₉ N ₄ O ₂₂	BiSubN	1304-85-4
Černý prach	-	BP	-
Silicid vápníku	Ca ₂ Si	Ca2Si	12049-73-9
Dusičnan bis(dikyandiamid) měďnatý	C ₄ H ₈ CuN ₁₀ O ₆	Cu komplex	102515-84-4
Oxid měďnatý	CuO	CuO	1317-38-0
Oxid železitý (2 %)	Fe ₂ O ₃	Fe2O3 2 %	1309-37-1
Oxid železitý (8 %)	Fe ₂ O ₃	Fe2O3 8 %	1309-37-1
Oxid železnato-železitý	Fe ₃ O ₄	Fe3O4	1317-61-9
Chloristan draselný*	KClO ₄	Kn+KP+cukr*	7778-74-7
Síra**	S	SX-81**	7704-34-9
-	-	Standard z granulátu	-
Oxid olovnato-olovičitý	Pb ₃ O ₄	Pb3O4	1314-41-6



Obr. 15: Molekula zásaditého dusičnanu měďnatého (BCuN) [28]



Obr. 16: Molekula zásaditého dusičnanu bismutitého (BiSubN) [29]

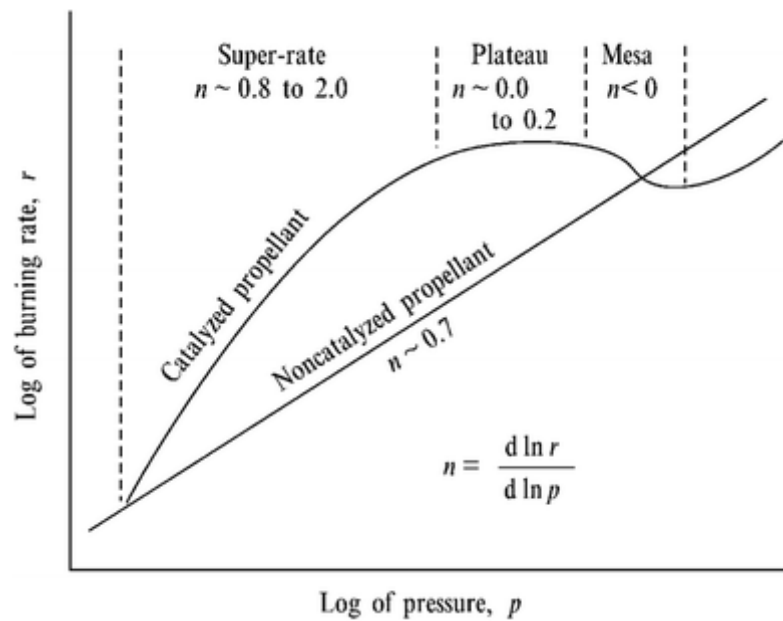


Obr. 17: Molekula měďnatého komplexu [dusičnan bis(dikyandiamid) měďnatý] [33]

Tab. 3: Moderátory a jejich vlastnosti + zdroje

Název	M [g/mol]	t_i [°C]	t_v [°C]	ρ [g/cm ³]	$\Delta_f H^\circ$ [kJ/mol]	$\Delta_f H^\circ$ [kJ/kg]	Barva	Zdroj
Karbid boru	55,255	2 350	>3 500	2,5	- 62,676	-1134,305	černošedá	[30] [31]
Uhlíkové nanotrubičky	12	sublimace	3 642	1,8-2,1	-	-	černá	[32]
Zásaditý dusičnan měďnatý	142,56	-	-	-	-	-	-	[28]
Oxid bismutitý	465,958	817	1 890	8,9	-573,9	-1231,656	žlutá	[33] [34]
Zásaditý dusičnan bismutitý	1461,99	260	-	4,928	-	-	bílý	[29]
Černý prach	-	-	-	-	-	-	-	
Silicid vápníku	108,24	-	-	-	-	-	-	
Dusičnan bis(dikyandiamid) měďnatý	355,7	-	-	-	-	-	purpurová	[35]
Oxid měďnatý	79,545	1 326	2 000	6,315	-156,063	-1961,946	černá	[36] [37]
Oxid železitý (2%)	159,687	1 539	-	5,25	-825,503	-5169,507	červená	[38] [39]
Oxid železitý (2%)	159,687	1 539	-	5,25	-825,503	-5169,507	červená	[38] [39]
Oxid železnato-železitý	231,533	1 597	2 623	5,	-1120,894	-4841,185	černá	[40] [41]
Chloristan draselný	138,55	610	-	2,524	-433	-3125,226	bílá	[42]
Síra	32,07	120	445	2,1	0	0	nažloutlá	[43]
-	-	-	-	-	-	-	-	
Oxid olovnato-olovičitý	685,6	500	-	8,3	-718,686	1048,258	červená	[44] [45]

Jeden z efektů moderátorů hoření lze pozorovat na Obrázku 18.



Obr. 18: Závislost rychlosti hoření na tlaku s popisky oblastí [46]

Obrázek výše charakterizuje mesa a plateau hoření. Při normálním stavu se zvyšujícím tlakem rychlost hoření stoupá. Některé moderátory ale mohou vytvořit tzv. mesa anebo plateau hoření. Plateau je část na grafu, kde je rychlost hoření v určitém rozmezí tlaků konstantní. Mesa je část grafu, kde v určitém rozmezí tlaků se vzrůstajícím tlakem rychlost hoření klesá.

3 METODIKA

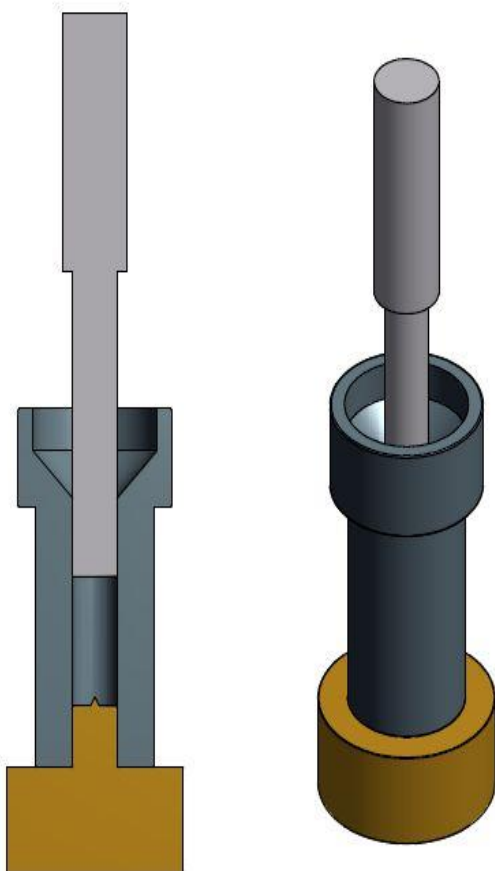
3.1 Výběr moderátorů

Cílem bylo na základě měření doby hoření a výšky plamene lisovaných pecek vybrat nejzajímavější moderátory pro experimenty s měřením tahu malých modelářských motorů.

3.1.1 Příprava vzorků

K posouzení vlivu moderátorů byly vyrobeny vzorky s moderátory + jeden bez moderátoru jako referenční (označen „standard“). Pro každý vzorek byla navážena standardní kompozice 32,5 g dusičnanu draselného a 17,5 g práškového cukru. Cukr – sacharóza byla místo sorbitolu použita proto, že se s ní při přípravě malých vzorků oproti sorbitolu lépe pracuje. Obě složky propelentu byly po dobu cca 10 sekund mlety v elektrickém mlýnku na kávu.

V případě vzorků s moderátorem byl do standardní kompozice přidán 1 g moderátoru, tj. 2 % moderátoru nad 100 %.



Obr. 19: Souprava nástrojů pro lisování zkušebních vzorků

Tímto způsobem byla připravena většina vzorků (označená Z23-001). Výjimkou byl vzorek „Fe₂O₃ 8 %“, kde byly do standardní kompozice přidány 4 g moderátoru = 8 % nad 100 %. Další výjimkou byl vzorek Z23-003 jehož složení bylo pozměněno tak, že 5 % KNO₃ bylo nahrazeno 5 % chloristanu draselného. KClO₄ má oproti KNO₃ atom kyslíku navíc.

Vzorek Z23-004 je původní československý modelářský propelent označený SX-81 [o složení KNO₃, sacharóza (původně sorbitol) a mletá síra v poměru 64 : 27 : 9]. Tento propelent byl vyvinut v roce 1981 v rámci projektu ASTRA. [47]

Z připravených práškových kompozic bylo naváženo 0,75 g a slisováno hydraulickým lisem do válečků o průměru 7,5 mm tlakem 100 MPa (1 000 bar). Ocelový lisovací nástroj měl drobný výstupek, který v lisovaném materiálu vytvořil důlek pro vložení modelářské zápalnice.

Vzorky byly uchovávány v hermetických plastových zkumavkách označených dle typu moderátorů. Vzorky měly výšku 11 mm a průměr 7,7 mm.

Některé moderátory způsobovaly výraznou nehomogenitu vzorku (tj. měly větší tendenci se drobit). Nejvíce to bylo patrné u vzorku „baytubes“ (uhlíkové nanotrubičky).

3.1.2 Experimenty

Se vzorky bylo provedeno celkem pět experimentů v pěti různých dnech. Byly měřeny doba hoření vzorků a maximální výška plamene. Ze všech měření byl pomocí mobilního telefonu pořízen videozáznam pro pozdější zpracování (snímková frekvence = 30 FPS; výjimka – 2. experiment – 4krát zpomalený záznam 120 FPS).

V prvních dvou experimentech byly vzorky postaveny na hliníkové kostce a byly zapalovány piezoelektrickým zapalovačem. Ze záznamů bylo patrné, že bylo potřeba způsob zážehu změnit, protože plamen zapaloval vzorky nerovnoměrně.



Obr. 20: Vzorky s moderátory testované v 1. experimentu

Ve druhém experimentu byl změněn způsob zapalování. Byly použity ústřížky silikonové modelářské zápalnice, dlouhé cca 10 mm. Ty byly umístěny do důlku na čele vzorku, který byl předtím ještě lehce zvětšen vrtákem o průměru 1,5 mm. Do důlku byla poté kápnuta kapička Kanagomu. Kanagom je lepidlo na bázi nitrocelulózy. [48] Takto byly připraveny dva vzorky. Po vsazení zápalnice do kapky Kanagomu byly vzorky umístěny na 5 minut do sušárny nastavené na teplotu 90 °C. Po odsušení byly při měření zápalnice na vzorcích zažehovány plynovým hořákem. Byla měřena doba hoření. Postup lepení zápalnic, sušení a měření se prováděly u všech vzorků stejně.

Při druhém experimentu byl zaznamenán pach SO_2 při teplotě vzorku s černým prachem (označení „BP“).

Při třetím experimentu byla změněna podstava z hliníkového bloku na spodní části plechovek – ve tvaru mističky.

Pro čtvrtý experiment byla za vzorky umístěna kartonová deska s měřítkem, podle kterého bylo možné určit výšku plamene. Na kovadlinku svěřáku byly umístěny mističky se vzorky.

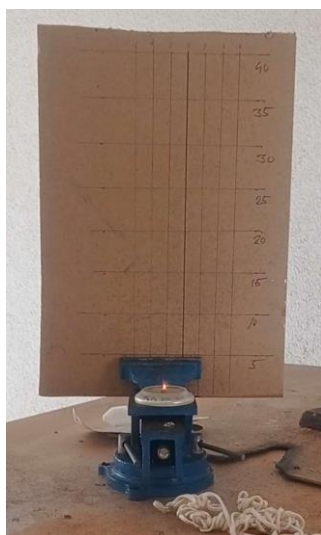


Obr. 21: Testování vzorku Bi_2O_3 s kartonovou deskou (4. experiment)

V posledním experimentu bylo na desku s rastroem doplněno měřítko pro určení šířky plamene. Vzorky byly nastříkány vrstvou z nitro-akrylátového tmelu „Prisma Tech Filler“ pro přesnější cigaretové hoření. Vzorky byly zažehovány „bezplamennou“ zápalnicí. Zápalnice byly ke vzorkům opět lepeny Kanagomem. Vzorky nebyly temperovány. Všechny vzorky byly otestovány dvakrát. Některé vzorky neshořely kompletně (pravděpodobně byly nasáklé tmelem).



Obr. 22: Připravené vzorky s ochrannou vrstvou (5. experiment)



Obr. 23: Vzorek Fe_2O_3 2 % s hořící zápalnicí (5. experiment)



Obr. 24: Zapalování vzorku Fe_2O_3 2 % pomocí doutnáku (5. experiment)



Obr. 25: Zapalování vzorku BCuN plynovým hořákem (2. experiment)

V různých experimentech se účastnily vzorky tak, jak je možné vidět v tabulce 4.

Tab. 4: Účast vzorků v experimentech č. 1 až 5
(číslo u vzorku = počet změřených vzorků při experimentu)

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.
Standard	0	0	0	3	2
B4C	1	1	1	1	2
Baytubes	1	1	1	1	2
BCuN	1	1	1	1	2
Bi2O3	1	1	1	1	2
BiSubN	1	1	1	1	2
BP	1	1	1	1	2
Ca2Si	1	1	1	1	2
Cu komplex	1	1	1	1	2
CuO	1	1	1	1	2
Fe2O3 2%	0	0	0	1	2
Fe2O3 8%	0	0	0	0	2
Fe3O4	1	1	1	0	2
Kn+KP+cukr	0	0	0	3	0
SX-81	0	0	0	3	2
Standard z granulátu	0	0	0	0	2
Pb3O4	0	0	0	0	2

3.1.3 Zpracování dat

Ze všech experimentů byla pořízena videa ve snímkové frekvenci 30 FPS (výjimka u 2. měření - 120 FPS zpomalený záznam bez zvuku). Videozáznamy byly zpracovány programem Adobe Premiere Pro (u čtvrtého měření DaVinci Resolve).

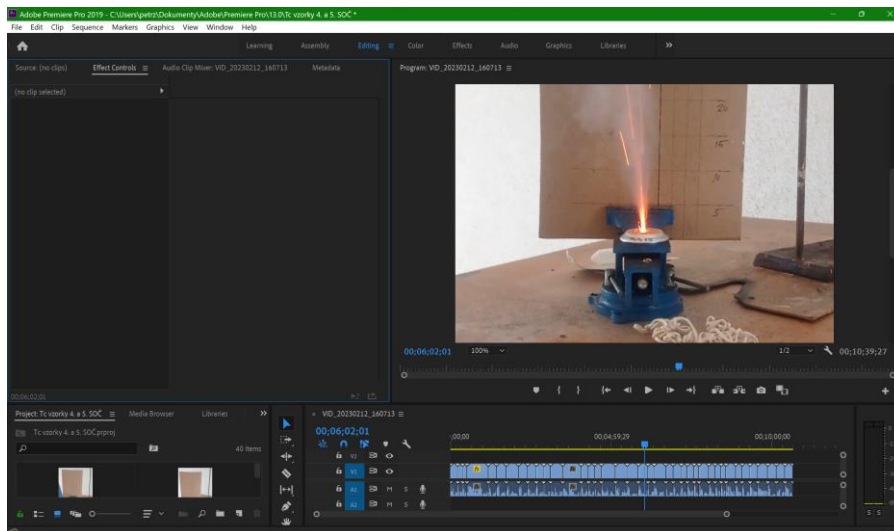
U prvních čtyř experimentů byla předmětem zpracování doba hoření vzorku. Po nahrání souborů byl určen začátek a konec hoření:

- Začátek = 1. objevení kouře (u 1. experiment - 1. syčení)
- Konec = vymizení rozžhaveného uhlíku na vzorku – splynutí s okolními spaliny (1. experiment – vymizení kouře)

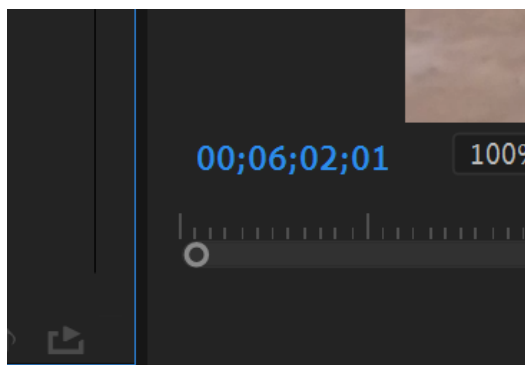
K odečtu byl použit časosběrný údaj. Formát časosběrného údaje vypadal takto:

hh:mm:ss;ff

- hh = hodiny
- mm = minuty
- ss = sekundy
- ff = snímky (f = frame – anglický výraz)



Obr. 26: Program Adobe Premiere s importovanými záznamy z měření pro změření maximální výšky plamene a jeho šířku (5. experiment)



Obr. 27: Časosběrný údaj v programu (5. experiment)

Ve střihacím programu byl zaznamenán počet sekund a snímků na startu a na konci (nebylo nutné zaznamenávat minuty). Sekundy byly převedeny na snímky (1 sekunda = 30 snímků). Počet snímků na začátku byl odečten od počtu snímků na konci. Nakonec byl rozdíl snímků vydělen 30 (= převod na sekundy).

Zpomalený záznam byl zpracován podobně. Rozdíl snímků ale bylo potřeba vydělit 120.

Tab. 5: Časy hoření vzorků v 1. experimentu

Vzorek	čas - údaj ;ss	čas - údaj ;ff	čas - počet snímků	čas [s]
BP	0	23	23	0,8
Fe3O4	3	7	97	3,2
BCuN	3	10	100	3,3
Cu komplex	3	21	111	3,7
CuO	2	27	87	2,9
BiSubN	3	12	102	3,4
Bi2O3	2	28	88	2,9
Ca2Si	2	26	86	2,9
B4C	3	16	106	3,5
Baytubes	2	4	64	2,1

Pro 4. a 5. experiment byla předmětem zpracování dat výška plamene (v 5. dodatečně i jeho šířka).

Pořízené záznamy z jednoho experimentu byly vloženy do stříhacího programu Adobe Premiere Pro (u 4. experimentu DaVinci Resolve). Každý záznam představoval jeden vzorek. Pro nalezení nejvyšších plamenů byl každý záznam „krokován“ snímek po snímku klávesami „left“ a „right“. Současně byl pořízen snímek nejvyššího plamene. U 4. měření byly navíc pořízeny snímky z časů 20, 40 a 60 snímků po začátku hoření (vzorek „BP“ měl tak velkou rychlost hoření, že jej nebylo možné vyhodnotit). Nejvyšší plameny byly zapsány do tabulky (v případě posledního experimentu i šířka nejvyššího plamene).

Tab. 6: Výšky plamenů z 5. experimentu (...v čase = hodnota časosběrného údaje ve stříhacím programu)

Vzorek	výška 1. pokus [cm]	šířka 1. pokus [cm]	...v čase	výška 2. pokus [cm]	šířka 2. pokus [cm]	...v čase
B4C	17	7	9:27:21	16	6	10:24:02
Baytubes	15	4	6:17:08	15	4	0:09:24
BCuN	11	2	4:37:12	12,5	3	8:59:26
Bi2O3	10	2,2	4:27:23	14	4	9:16:03
BiSubN	11	3	6:53:16	13	3	10:35:11
BP	40	10	6:32:22	>40	~10	9:49:16
Ca2Si	13	3	8:24:00	15	3,5	8:32:10
Cu Komplex	12	2,2	5:01:24	11	2	7:18:02
CuO	6	1	7:56:05	8	3	8:11:09
Fe2O3 2%	16	4	5:41:21	10	2	1:23:15
Fe3O4	9	5	10:05:26	16	5	2:33:05
KN+KP+Cukr	-	-	-	-	-	-
Standard	13	2	5:21:09	12,5	4	0:21:16
SX-81	14	6	7:04:29	18	5	1:40:00
Fe2O3 8%	15	5	6:05:28	18	8	1:09:18
Standard z granulátu	10	4	0:28:21	13	4	2:50:19
Pb3O4	15	3,8	4:15:28	10	4	7:40:27

Tímto způsobem byla zpracována data ze všech experimentů.



Obr. 28: Nejvyšší plamen vzorku BiSubN



Obr. 29: Nejvyšší plamen vzorku SX-81

3.1.4 Vyhodnocení

Na začátku bylo jasné, že moderátory ve vzorcích „BP“ a „Pb3O4“ nebudou použity. Představují zdravotní a manipulační rizika.

Vzhledem k povaze hoření byl vybrán propelent československého původu SX-81. Dále byl vybrán moderátor Fe_2O_3 pro svoje rozšíření v komunitě raketového modelářství. Poslední vybrané vzorky jsou zkoumány na ÚEnM UPa: Bi_2O_3 , zásaditý dusičnan bismutitý a zásaditý dusičnan měďnatý.

3.2 Výroba motorů

Poté, co byly vybrány moderátory k měření, bylo potřeba vyrobit motory, ve kterých se uplatní.

3.2.1 Výběr spalovací komory a výroba trysek

Jako vhodná spalovací komora byla vybrána papírová dutinka vyráběná firmou EGER Ohře. [49] Dutinka je dlouhá 75 mm, má vnitřní průměr 14 mm a vnější průměr 17,6 mm (tloušťka stěny 1,8 mm).



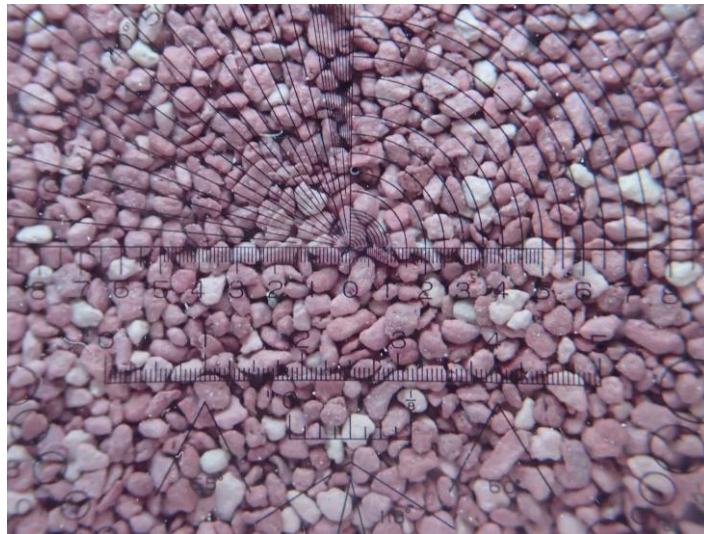
Obr. 30: Papírová dutinka EGER

Jako materiál pro trysku byl zvolen granulát připravený z mikromletého kaolínu MKM, vodního skla a vody v poměru 860 : 70 : 70 g.

Směs byla granulována, poté byla v tenké vrstvě za normálních podmínek předsušena a nakonec byla opakovaně prosévána a drcena. Výsledkem bylo několik frakcí granulátu [mm]:

- 0,315–0,7
- 0,7–1
- 1–1,25
- 1,25–1,6
- 1,6–2

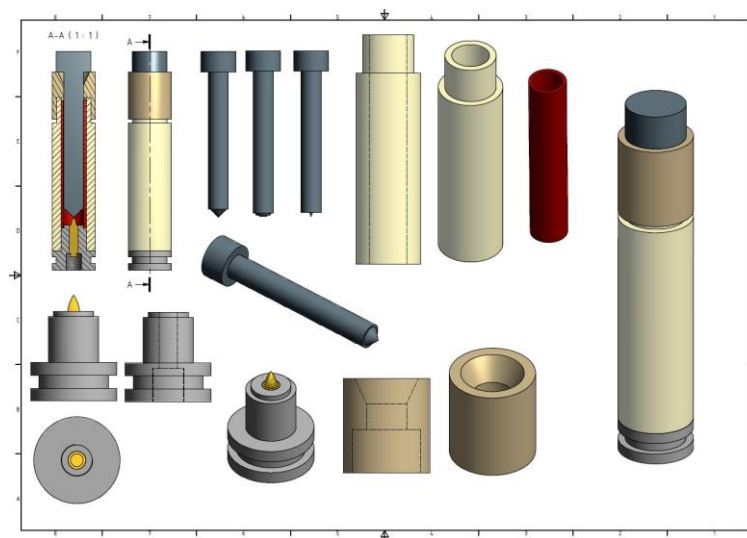
Jednotlivé frakce byly sušeny v rotační sušárně při teplotě 105 °C a poté byly upraveny acetonovým roztokem pryskyřice Rybetak. Po odpaření acetonu bylo ke granulátu přidáno 0,1 % hmotnosti granulátu stearátu zinečnatého (10 g).



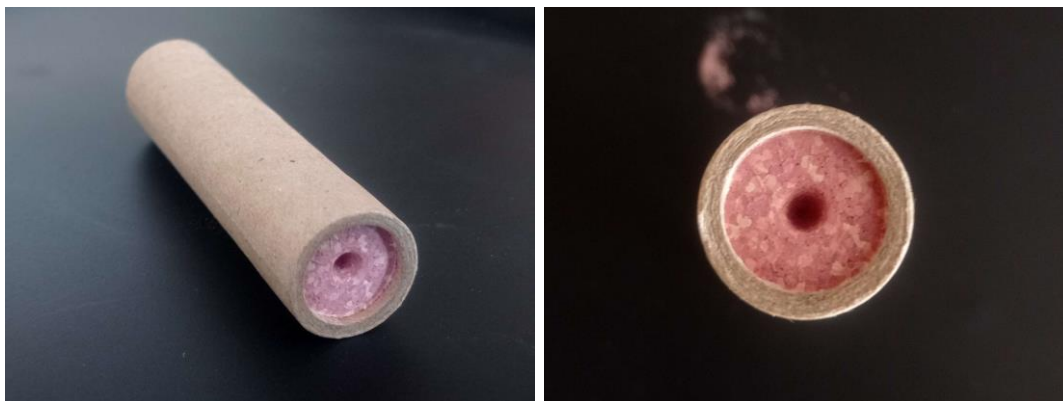
Obr. 31: Kaolínový granulát pro lisování trysek frakce 0,315 – 0,7 mm

Trysky byly vyráběny lisováním granulátu do dutinek EGER. Do každé dutinky bylo naváženo 3,3 g granulátu frakce 0,315 – 0,7 mm.

Dutinka EGER byla vložena do ocelového lisovacího pouzdra a pouzdro bylo zespodu uzavřeno zátkou (někde s pohyblivým hrotem o průměru 3 mm). Potom byla do pouzdra vsypána odvážená dávka kaolínového granulátu a byla slisována dutým trnem pod tlakem 268 bar (27 MPa). Dutým trnem byl vytvarován konvergentní vstup do trysky a zátkou s hrotem divergentní výstup.



Obr. 32: Souprava nástrojů pro lisování trysek



Obr. 33: Dutinka s nalisovanou tryskou – pohled ze strany a seshora

Takto nalisované trysky jsou neprůchozí. To pro budoucí postup výroby nepředstavuje problém (vysvětleno později).

Pro některé trysky byla použita hmota na bázi geopolymery a jemné frakce šamotu. Poměry hmot jsou vyznačeny v Tabulce 7.

Tab. 7: Poměry látek ve hmotě pro trysky na bázi geopolymery (samostatně poměry geopolymery a poměr geopolymery : šamot pro hmotu na trysku)

	NaOH	Metakaolin	Vodní sklo	Voda
	1	25	14	7
Jemná frakce šamotu	Geopolymer			
75	35			

3.2.2 Evidence a příprava motorů

Motory byly před plněním propelentu zaevidovány. Předem provrtané trysky byly uzavřeny papírovou ucpávkou.

Pro evidenci motorů byl vytvořen příslušný formulář. Každý formulář eviduje jednu sérii motorů stejných vlastností. Ve formuláři byly zaznamenávány hmotnosti dutinek v různých fázích výroby za účelem odečtení hmotnosti propelentu pro budoucí výpočty.

Série modelářských raketových motorů - formulář													
Název série				Počet motorů v sérii			Spalovací komora						
Pz.2303.Az φLP.A. +				3			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">typ</td> <td style="width: 50%;">liner</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">φ</td> <td style="text-align: center;">-</td> </tr> </table>			typ	liner	φ	-
typ	liner												
φ	-												
Tryska			TPH										
Materiál	d [mm]	datum výroby	chemická kompozice	kanál		metoda výroby		datum výroby					
Z	3	-	φ	KC	3	L	V	10.3.2023					
Zakončení		Den založení formuláře			Speciální skladování								
Provedení	Datum výroby	10.3.2023			-								
P	10.3.2023												
Testování			Zahrazení										
Den	Způsob zážehu	Tenzometr	Začátek	Konec									
11.3.2023	φ	φ	33,5	108									
Navážky motorů v různých fázích výroby + navážka TPH - m [g]													
pořadové číslo	1	2	3										
Tryska + plášť	-	-	-						∅				
před plněním TPH	8177	8176	8147	}									
po naplnění TPH	27,27	20,83	16,03										
Před měřením	23143	22164	18186										
Po měření	11,07	10,76	11,53										
TPH	72,15	72,07	71,62						72,285				

Prostor pro poznámky

- neprovdaná tryška
- ~~tryška~~ nvyvářeno při 110°C

nezapočítán do průměru
↓
menší navážka
(nezbylo TPH)

Obr. 34: Vyplněný formulář pro sérii motorů pz.2303.A.ZφLP.A

Každý motor byl označen podobným kódem uvedeným níže. V Tabulkách 8 a 9 jsou uvedena legenda znaků v kódu a formuláři.

pz.2303.A.ZφLP.A

Tab. 8: Legenda značení a atribut v názvu série motorů

značka	definice
pz	označení mých motorů (zkratka Petr Zelinka)
2303	rok a měsíc soustředěných prací na motoru
A/B/C/...	1. proměnná pro lepší rozlišení sérií
Z/Y	trysky z granulátu/z geopolymerové hmoty
$\alpha/\beta/\gamma/\delta/\varphi/\sigma$	kompozice TPH - KNSB - 65 % : 35 % = standard (+ 2 % moderátor - Bi ₂ O ₃ , BiSubN, BCuN, Fe ₂ O ₃)/SX-81
K/L	metoda plnění motoru – tavení prášku v dutince/lití
P	styl zakončení – polyuretanová zátka
A/B/C/...	2. proměnná pro lepší rozlišení sérií

Tab. 9: Legenda ostatních atribut a značek ve formuláři

atribut	značení	definice
typ dutinky	1	EGER Ohře
materiál trysky	(...)	(...)
chemická kompozice TPH	(...)	(...)
geometrie kanálu	KC	kruhový vycentrovaný
metoda plnění	(...)	(...)
metoda tvorby kanálu	V	vrtání
způsob zážehu	1	trocha BKNO ₃ + zelen zápalnice
tenzometr (= typ měřidla)	1	konstrukce + REDALS

3.2.3 Výroba a plnění propelentu

Motory byly plněny propelentem KNSB. Propelent byl připravován a plněn dvěma způsoby:

1. Příprava taveniny propelentu v plechovém hrnku s výlevkou a následné nalití do motoru
2. Příprava práškové formy propelentu, která byla napěchována a tavena v dutince

Oběma metodami byly každou kompozicí KNSB naplněny 2–3 motory. Oba postupy přípravy propelentu byly prováděny současně. V jeden den bylo možné vyrobit pro oba způsoby plnění propelentu dvě kompozice KNSB. Všechny kompozice byly vyrobeny a naplněny během 3 dnů. Pro srozumitelnost kroků bude popsán vždy jeden pracovní postup.

Základ každé palivové kompozice byl:

- Sorbitol – mletý v mlýnku na kávu (4 polévkové lžíce po dobu 30 s)
- KNO_3 – mletý obdobně, jako sorbitol a sušen při teplotě $130\text{ }^\circ\text{C}$ v keramické misce na polévku minimálně 2 hodiny
- Moderátor – drcený v třecí misce po dobu cca 3–5 minut (v případě práškové síry pro SX-81 – jedna polévková lžíce mleta v mlýnku po dobu 30 s)



Obr. 35: Mlýnek použitý k mletí KNO_3 a sorbitolu



Obr. 36: Moderátory připravené v třecích miskách na drcení

Poměr složek propelentů je uveden v Tabulce 10.

Tab. 10: Procentuální zastoupení složek v propelentech (vlevo – standard + moderátor; vpravo – SX-81)

látka	podíl [%]	látka	podíl [%]
KNO_3	65	KNO_3	64
sorbitol	35	sorbitol	27
(moderátor)	2	mletá síra	9
celkem	100 (102)	celkem	100

Vážení bylo prováděno na váze s přesností $0,01\text{ g}$ (max. 200 g). Sušení propelentů probíhalo v sušárně při teplotě $130\text{ }^\circ\text{C}$ [kromě SX-81 a Fe_2O_3 – byly připravovány současně při $110\text{ }^\circ\text{C}$, což je hraniční teplota pro přípravu SX-81 (při $115\text{ }^\circ\text{C}$ se začíná síra tavit)]. [47]



Obr. 37: Váha použitá k navážkám složek propelentu

3.2.4 Lití propelentu

Výhodou tohoto postupu je jednoduchá příprava. Nevýhodou je riziko spojené se samotným litím propelentu do dutinky – propelent při lití rychle chladne a pak se hůře lije. Další nevýhodou jsou ztráty připraveného propelentu, který se nalepuje na stěny hrnku.

Do dvou plechových hrnků bylo naváženo 32,5 g KNO_3 , 17,5 g sorbitolu a 1 g moderátoru (v případě kompozice SX-81 32 g KNO_3 , 13,5 g sorbitolu a 4,5 g síry).



Obr. 38: Vážení složek propelentů (kompozice s moderátory BiSubN a BCuN)

Plechové hrnky byly poté umístěny do sušárny. Když byly hrnky v sušárně, začal se připravovat propelent druhou metodou – pēchováním prášku propelentu.

V průběhu práce byl zaznamenán pokrok ve zdokonalování manuální zručnosti u metody pēchování prášku: Příprava propelentů trvala poprvé 2 h a 48 min, podruhé 1 a 30 minut a nakonec jen 1 hodina a 15 minut.



Obr. 39 Propelenty SX-81 a KNSB + Fe₂O₃ v sušárně připravené k tavení

Během tohoto času se sorbitol roztavil. Propelent byl občas promíchán dřevěnou špachtlí. Při dostatečném promíchání vznikla homogenní hmota konzistence lepivého těsta zbarvená podle barvy moderátoru. U moderátoru s označením „BiSubN“ byly pozorovány hrudky v tavenině. Propelent SX-81 měl vzhledem k nižšímu obsahu sorbitolu konzistenci sorbetu. Při jeho tavení byl cítit SO₂.

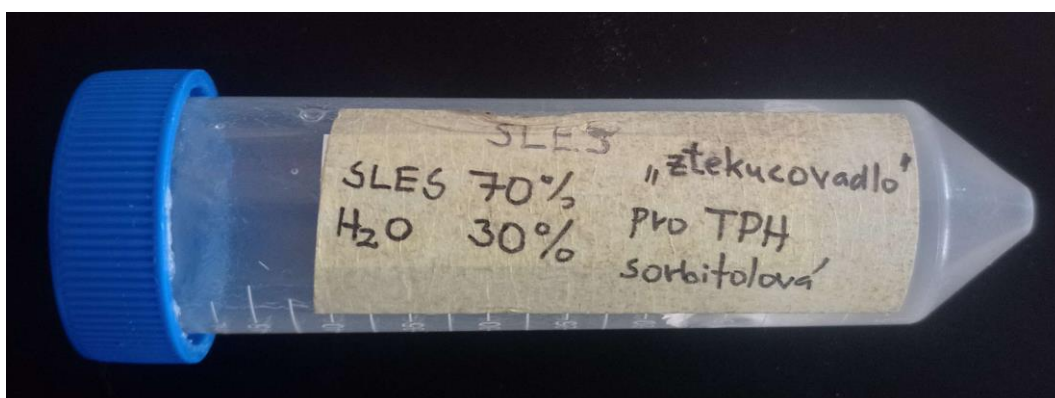


Obr. 40: Roztavené kompozice KNSB (nalevo SX-81 a KNSB + Fe₂O₃, napravo KNSB + BiSubN)



Obr. 41: Roztavená kompozice KNSB + BCuN

Po uplynutí času (1,25–3 h) bylo do taveniny dávkováno malé množství SLESu (laurethsulfátu sodného). Tato látka snižuje viskozitu taveniny a usnadňuje tak lití. Richard Nakka doporučuje množství 1 % hmotnosti propelentu. Z předešlých zkušeností bylo přidáno ještě méně (lehce pod doporučeným množstvím R. Nakky). Množství bylo tak malé, že bylo váhou nezaznamatelné. Proto je na Obrázku 43 vyobrazeno množství přidávaného SLESu.



Obr. 42: Zkumavka se SLESem



Obr. 43: Množství přidávaného SLESu na špejli



Obr. 44: Ztekucený propelent s přidáním SLESem (KNSB + BCuN/BiSubN)

Požadované množství SLESu bylo nabráno ze zkumavky na špejli a poté natřeno na dřevěnou špachtli, kterou byla tavenina promíchána. Ta začala měnit konzistenci a začalo se objevovat mýdlové chemické aroma a bublinky.

SLES obsahuje 30 % vody, která musela být z taveniny vyvařena. Čas vyvaření byl stanoven na 45 minut. Po uplynutí této doby se začal vařit i SLES a propelent se stal nelitelným.

Do propelentu SX-81 bylo dávkováno trojnásobné množství SLESu, aby se jeho konzistence blížila ostatním propelentům. Vyváření vody ze SLESu v SX-81 probíhalo takto (záznam z deníku: čas – akce):

- 13:08 – přidán dvojnásobek
- 13:35 – přidána další dávka – celkem už trojnásobek
- 14:05 – plánovaný začátek lití

Po uplynutí 40 minut byly dutinky umístěny do sušárny, aby se eliminovalo pozdější chladnutí propelentu v dutince a potenciální riziko defektů v zrna (pouze u dutinek s propelentem SX-8 a pro kompozice KNSB + Fe₂O₃ a BCuN).

Lití bylo zahájeno po 45 minutách. Dutinka byla postavena na váhu. Pod dutinkou byl čtvereček papíru, aby se zachytili případné kapky taveniny.



Obr. 45: Lití propelentu KNSB s BCuN do dutinky

Navážka taveniny do jedné dutinky byla cca 12 g. Případné defekty v tavenině byly odstraněny vibracemi. Ostatní dutinky byly naplněny stejným způsobem.

Rozptyl navážek byl 11,3–12,6 g. U moderátorů Fe_2O_3 a SX-81 byly navážky o 1/3 propelentu nižší. To bylo způsobeno zmíněnými ztrátami při lití.

3.2.5 Tavení propelentu v dutince

Oproti lití je tento způsob pracnější a prašnější a nelze při něm naplnit celou dutinku. Výhodou jsou prakticky nulové ztráty a rizika při plnění.

Složky propelentu byly naváženy obdobně jako u metody lití. U kompozic „standard“ a „ Bi_2O_3 “ bylo naváženo 39 g KNO_3 + 21 g sorbitolu (+ 1,2 g moderátoru).



Obr. 46: Práškové formy KNSB v mlýnku před mletím (BCuN nalevo a Fe₂O₃ napravo)



Obr. 47: Prášková forma SX-81 v mlýnku po mletí

Celé množství bylo najednou homogenizováno v elektrickém mlýnku na kávu po dobu 30 s. Byla přichystána dvojice/trojice dutinek. Poté byl prášek násypkou dávkován přímo do dutinek a plastovým pístem upěchován.



Obr. 48: 3D vytištěné písty



Obr. 49: Píst v dutince



Obr. 50: Práškový propelent KNSB s BCuN nalevo a Fe₂O₃ napravo



Obr. 51: Násypka pro dávkování práškového propelentu BCuN

Dávkování bylo třikrát opakováno. Po každé dávce stoupla hladina napěchovaného prášku. Postup dávkování byl u všech dutinek stejný. Nakonec byly dutinky umístěny do sušárny.



Obr. 52: Práškový KNSB s BiSubN – 1. upěchovaná vrstva nalevo
a 2. vrstva nasypaná k upěchování napravo



Obr. 53: Dutinky v sušárně s práškovým KNSB + Fe₂O₃ a SX-81 připraveným na tavení

Po 1 h 17 min až 1 h 50 min byly ze sušárny vyjmuty dutinky s pěchovanou práškovou formou propelentu. Propelent v dutince měl po vyhřátí konzistenci lepivého těsta.

Nakonec byla tavenina v dutince stlačena stejným plastovým pístem. Při pomalém vyndávání bylo pístem otáčeno. Při prudkém vytažení by se značné množství TPH přichytila na píst a hladina zrna by byla porušena.

3.2.6 Finalizace motorů

Finalizací motoru se rozumí zavíčkování a vytvoření kanálu.

Motory byly víčkovány polyuretanovou zalévací hmotou PU501HR – PH27. [50] K nalévání a míchání složek PU byly zhotoveny mističky/lodičky z rozříznutých vršků PET lahví.



Obr. 54: Mističky ve tvaru lodiček k odlévání polyuretanu do motorů



Obr. 55: Použité hmoty pro zavíčkování motoru – PU a polykyanát (tvrdidlo)

Zalévací hmota se s polykyanátem míchá v poměru 100 : 23.

Po odvážení složek byla směs bezprostředně promísena lžičkou. Směs se po smísení zředila a zahřála. Poté bylo na váhu postaveno několik motorů (dle limitu váhy) a bylo do nich vlito >2 g hmoty.

Výrobce uvádí čas plného vytvrzení cca 15 minut. [50] Hmota už po minutě začíná houstnout a po třech minutách je z ní lepivá nelitelná guma.



Obr. 56: Lití polyuretanu do motorů = „víčkování“

Po ztvrdnutí PU a víčka byl motorům vytvořen kanál. Ten byl vyvrtán vrtákem o průměru 3 mm do hloubky 25 mm.

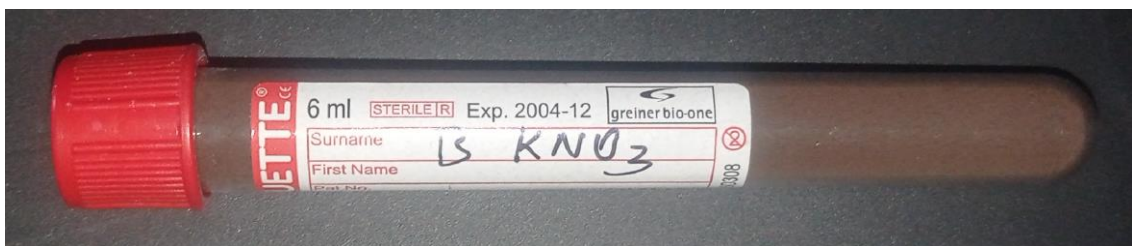
4 SBĚR DAT, ZPRACOVÁNÍ DAT A PREZENTACE VÝSLEDKŮ

Měření motorů a zpracování dat proběhlo ve dvou dnech. První den byly změřeny motory série α (standard) a β (Bi₂O₃). Druhý den byl změřeny ostatní motory.

4.1 Sběr dat

4.1.1 Příprava zážehů

Zážeh motoru je důležitou součástí přípravy motoru k měření. Z předešlých zkušeností vyplývá, že způsob zážehu může ovlivnit průběh hoření propelentu v motoru. Zážeh motorů byl prováděn zápalnicí a zážehovou složí BKNO₃. [51]

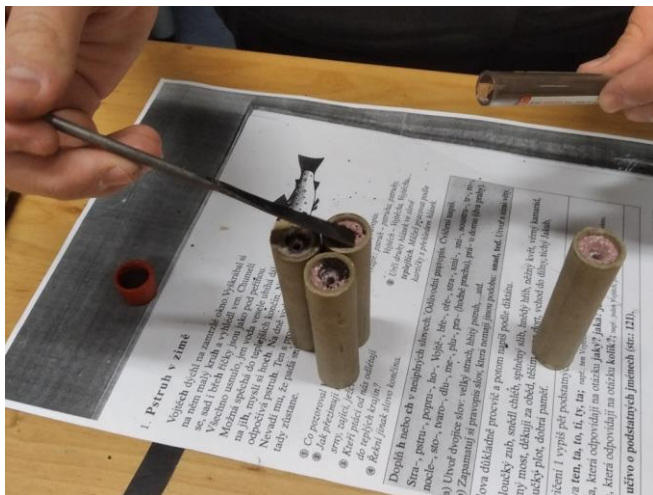


Obr. 57: Zkumavka s BKNO₃



Obr. 58: Použitá komerční zápalnice

Nejdříve byly kanály v motorech pročištěny vrtákem, aby se odstranili částičky vzniklé při vrtání. Poté bylo do motoru dávkováno malé množství BKNO₃ (špetka na špičce špachtle). Pokud zůstala část BKNO₃ v okolí otvoru trysky, byla poklepáním setřesena do motoru. Nakonec byla do motoru vsunuta zápalnice (délka cca 6 cm).



Obr. 59: Dávkování BKNO₃ do motoru

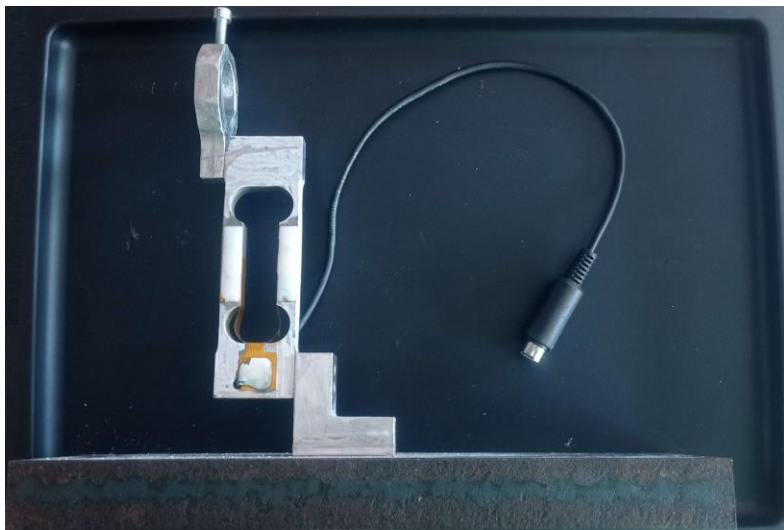


Obr. 60: Motory připravené k měření

4.1.2 Popis použitého měřiče tahu

K měření motorů byl použit měřič tahu, který se skládá ze dvou částí – základny s tenzometrem a REDALSu = krabičky s elektronikou pro záznam dat.

REDALS má dva konektory – magnetofonový konektor DIN5 pro komunikaci s tenzometry a konektor RS232 pro komunikaci s PC (připojení do PC přes USB-A). REDALS je napájen 9V baterií. Na krabičce jsou dva přepínače – zapnuto/vypnuto a manuální/automatické měření. K měření byl použit manuální mód. Zeleným tlačítkem se spouštělo měření, indikované rozsvícenou zelenou LED diodou.



Obr. 61: Základna s tenzometrem



Obr. 62: REDALS



Obr. 63: Kompletní sestava komponent potřebná k měření a zpracování záznamů

Modrým fixem je znázorněn požadovaný vektor tahu motoru pro měření.

4.1.3 Měření tahu

Z každého měření byl mobilním telefonem pořízen záznam pro případnou pozdější analýzu. Základna s tenzometrem byla opřena o schod, aby se zamezilo jejímu pohybu. REDALS byl připojen k tenzometru. Do třmenu tenzometru byl vložen připravený motor a šroubem byl upevněn. Spínač na krabici REDALSu byl přepnut do polohy „On“ (zapnuto), zápalnice v motoru zažehnuta plynovým hořákem a pak zeleným tlačítkem spuštěno měření.



Obr. 64: Zapalování motoru s moderátorem BiSubN, metoda tavení TPH v dutince, pořadové číslo 3



Obr. 65: Plamen motoru s propelentem SX-81, metoda tavení TPH v dutince, pořadové číslo 1



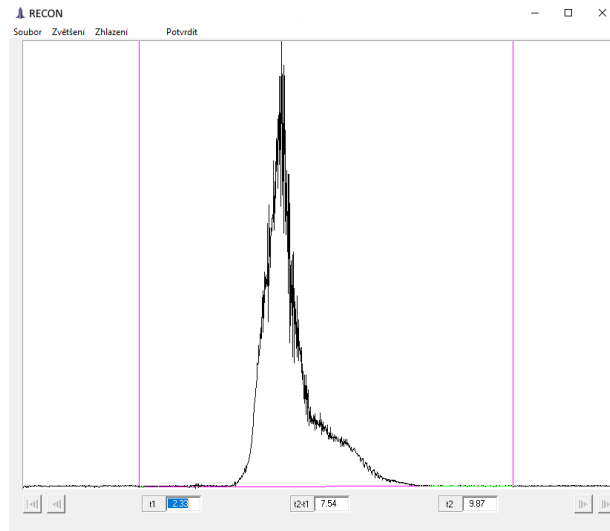
Obr. 66: Zapálená zápalnice u motoru s moderátorem Fe_2O_3 , metoda tavení TPH v dutince, pořadové číslo 3

Po dohoření motoru byl záznam stisknutím zeleného tlačítka zastaven a vypnuto napájení REDALSu (rychlé vybíjení 9V baterie). Postup měření byl pro všechny motory stejný. Vyhořelé motory byly uchovávány pro pozdější analýzu.

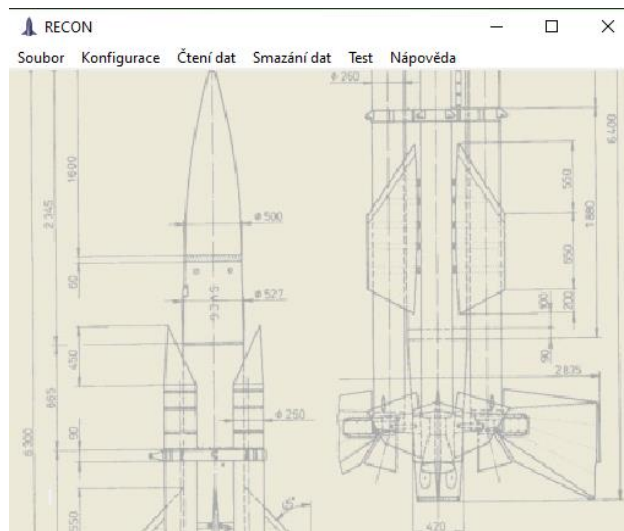
4.1.4 Stahování dat z REDALSu

Mezipaměť REDALSu má kapacitu 256 kbit a může uchovat 10 záznamů měření v celkové délce 160 sec. [52] Po ukončení měření dvou sérií motorů se stejným moderátorem byl REDALS vypnut a od základny odpojen.

REDALS byl poté znovu zapnut, připojen k počítači s OS Windows 10 a pomocí programu RECON (vyhodnocovací software REDALSu) byla data z mezipaměti REDALSu stažena do počítače a zpracována. Výstupem byly grafy závislosti tahu na čase.



Obr. 67: Rozhraní programu RECON po načtení záznamu z mezipaměti REDALSu (PZ.2303.A.ZφK1.A.1)



Obr. 68: Rozhraní programu RECON po spuštění

Data byla ukládána do složek s datem měření. Podsložky byly rozděleny dle názvu moderátoru. V každé takové podsložce byly soubory nazvané KX (označení metody pro tavení propelentu v dutince) a LX (označení metody lití propelentu). X znázorňuje číslo od 1 do 3.

4.2 Zpracování dat

K výpočtu specifického impulsu bylo zapotřebí zadat navážku propelentu. U litých motorů byla určena jako rozdíl hmotnosti těsně před litím a po lití. U motorů, kde byl propelent taven v dutince, byl použit rozdíl hmotnosti dutinky před pýchováním prášku a po vytavení a stlačení taveniny propelentu.

Tab. 11: Použité navážky propelentů pro výpočet I_{sp} pro každou sérii motorů

Moderátor	Standard (α)		Bi2O3 (β)		BiSubN (γ)	
Metoda plnění	Tavení v dutince	Lití	Tavení v dutince	Lití	Tavení v dutince	Lití
\varnothing m [g]	8,695	12,345	8,71	12,0933	9,295	11,6466
Počet motorů	2	2	2	3	2	3
Moderátor	BCuN (δ)		Fe2O3 (φ)		SX-81 (σ)	
Metoda plnění	Tavení v dutince	Lití	Tavení v dutince	Lití	Tavení v dutince	Lití
\varnothing m [g]	8,88666	11,88	8,89	12,285	9,04333	12,16
Počet motorů	3	3	3	2	3	1

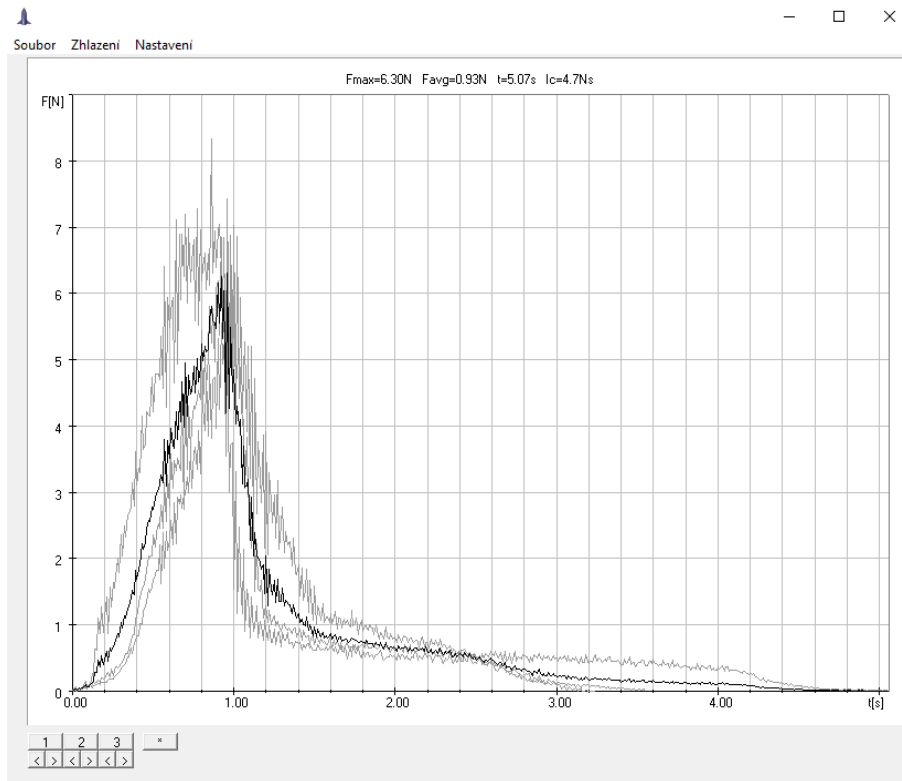
Program RECON umožňuje společné vyhodnocení až 10 záznamů a vytvoření jejich průměru. [52] Protože jsou začátky a konce záznamů určovány operátorem subjektivně, je možné záznamy tahu na obrazovce posouvat vlevo/vpravo tak, aby se průběhy tahu, co nejvíce překrývaly. V této práci byly průběhy tahu posouvány, až maximum na křivce průměrné hodnoty tahu (znázorněné černou barvou) mělo nejvyšší hodnotu.

Průběhy tahu bylo možné vyhladit – bylo použito vyhlazení úrovně 8. Jako univerzální rozměr grafu byly zvoleny rozměry uvedené na Obrázku 69.

	Rozsah	Popis	Rastr	
X	<input type="text" value="8"/>	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.25"/>	[s]
Y	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	[N]
<input type="button" value="Výchozí hodnoty"/>				

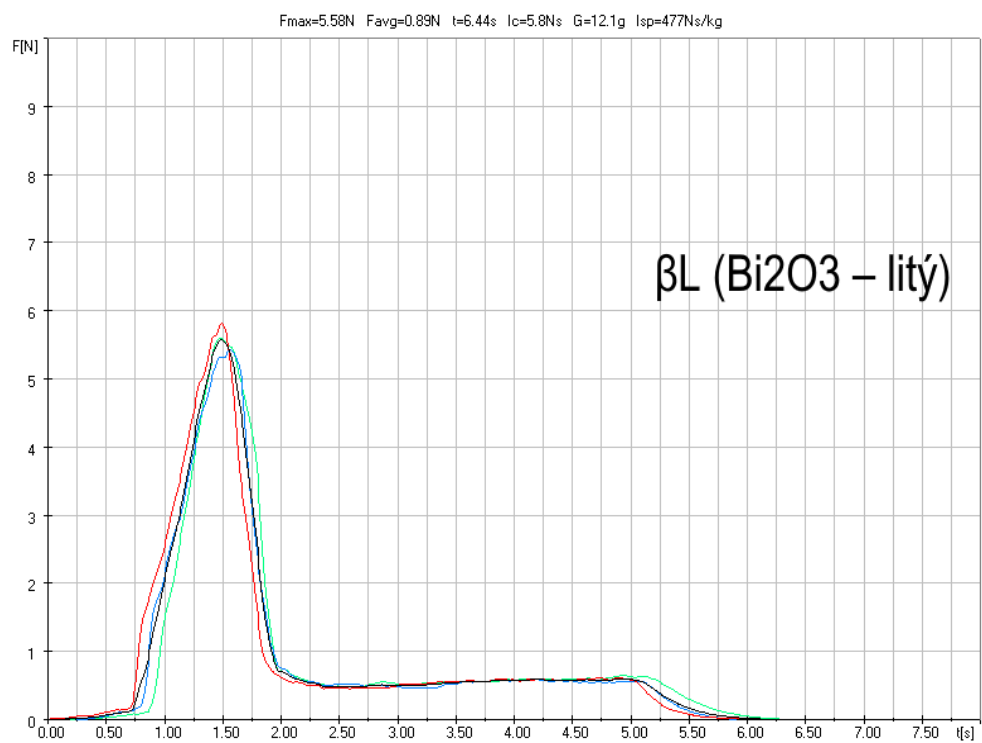
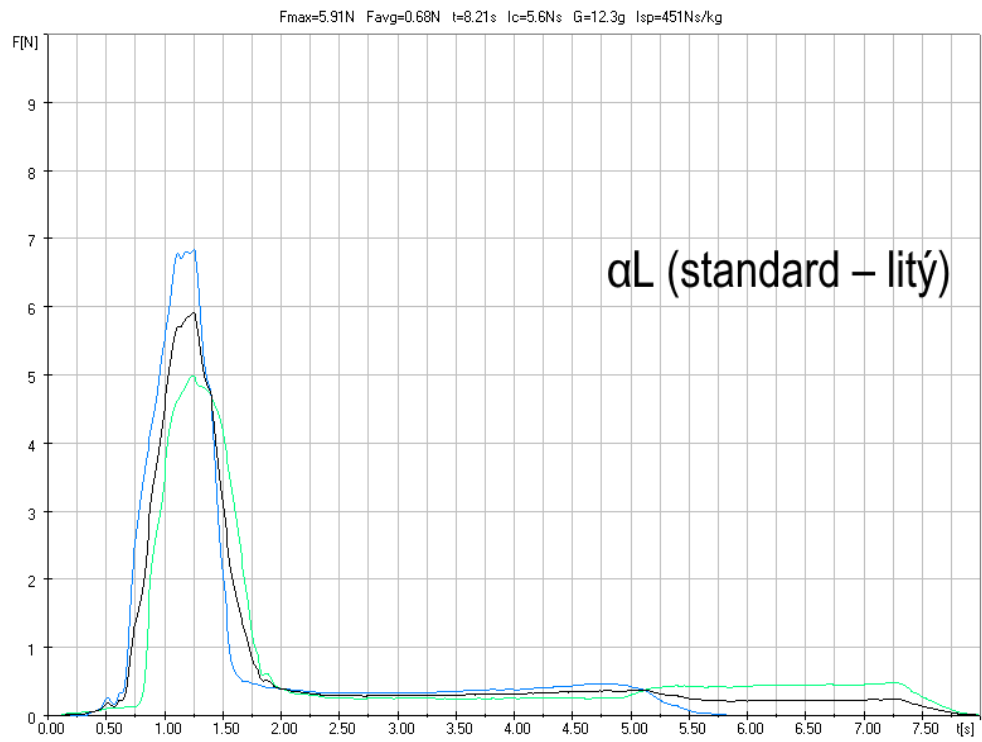
Obr. 69: Výchozí hodnoty pro rozměry grafu

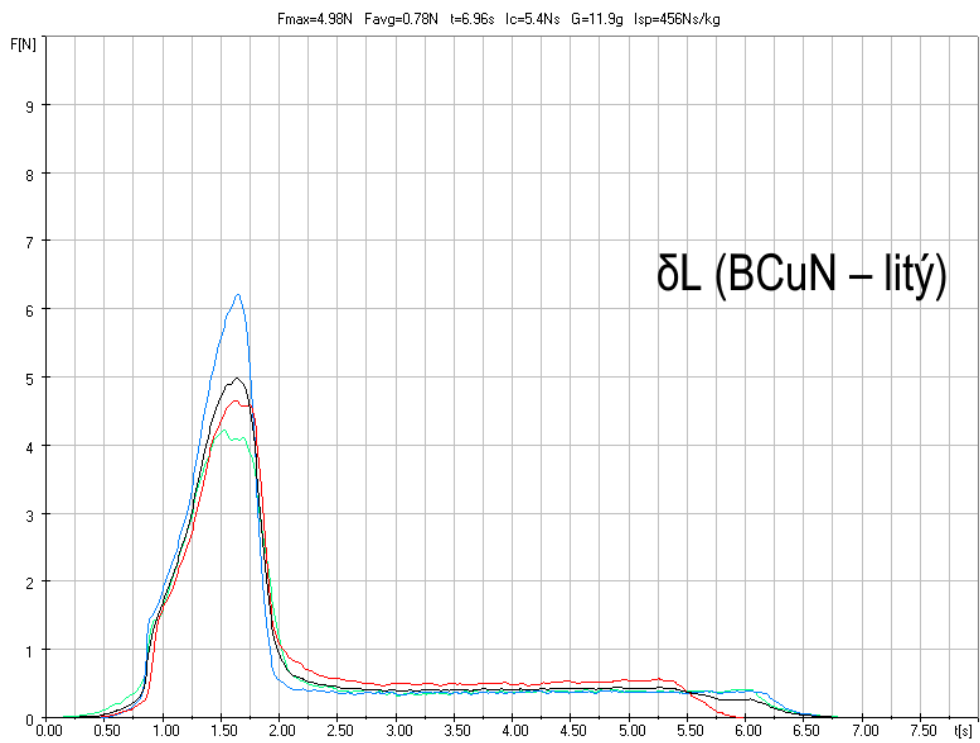
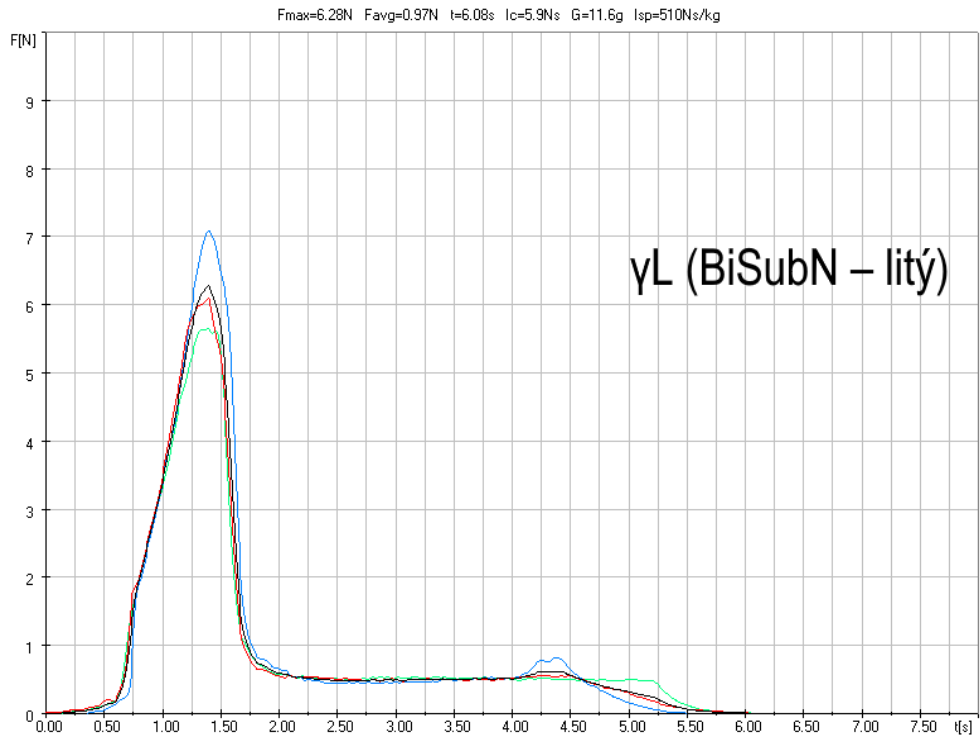
Průběhy tahu byly vyznačeny zelenou a modrou barvou (zelená – 1. záznam; modrá – 2. záznam). Případný 3. záznam pak barvou červenou. Výchozí barvou pro jednotlivé záznamy je šedá.

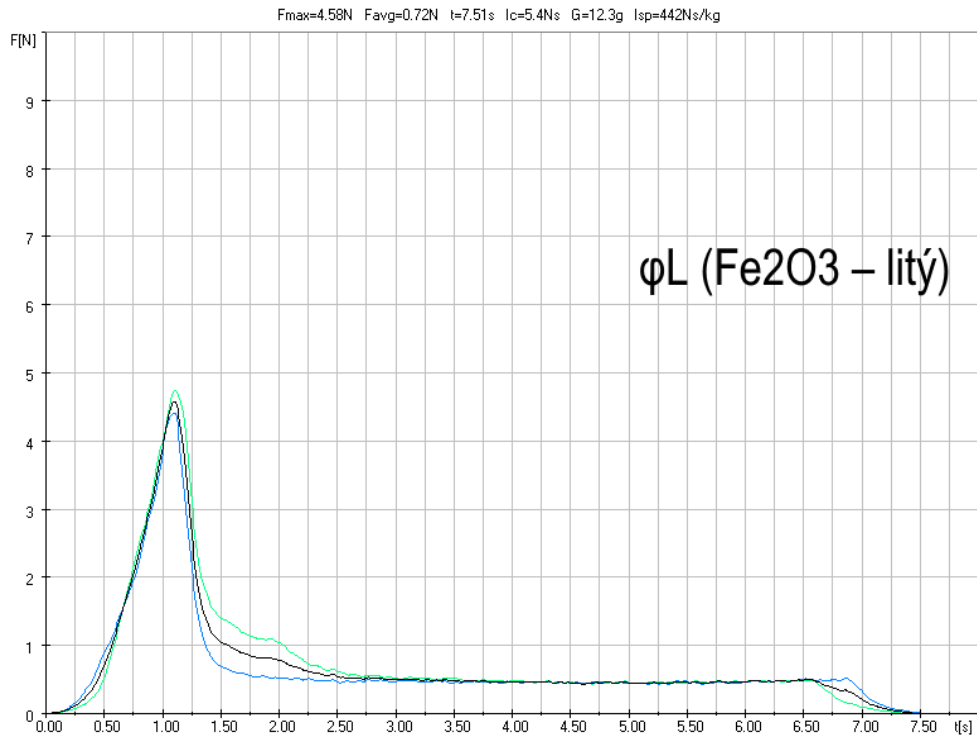


Obr. 70 Rozhraní RECONu po načtení několika záznamů

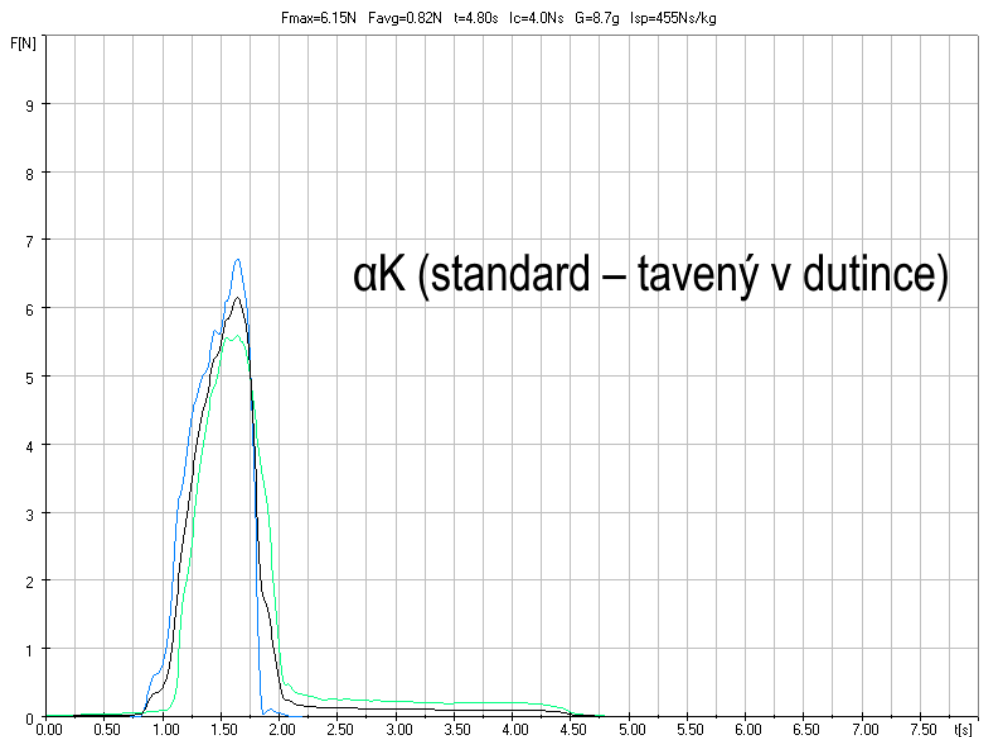
4.3 Prezentace výsledků

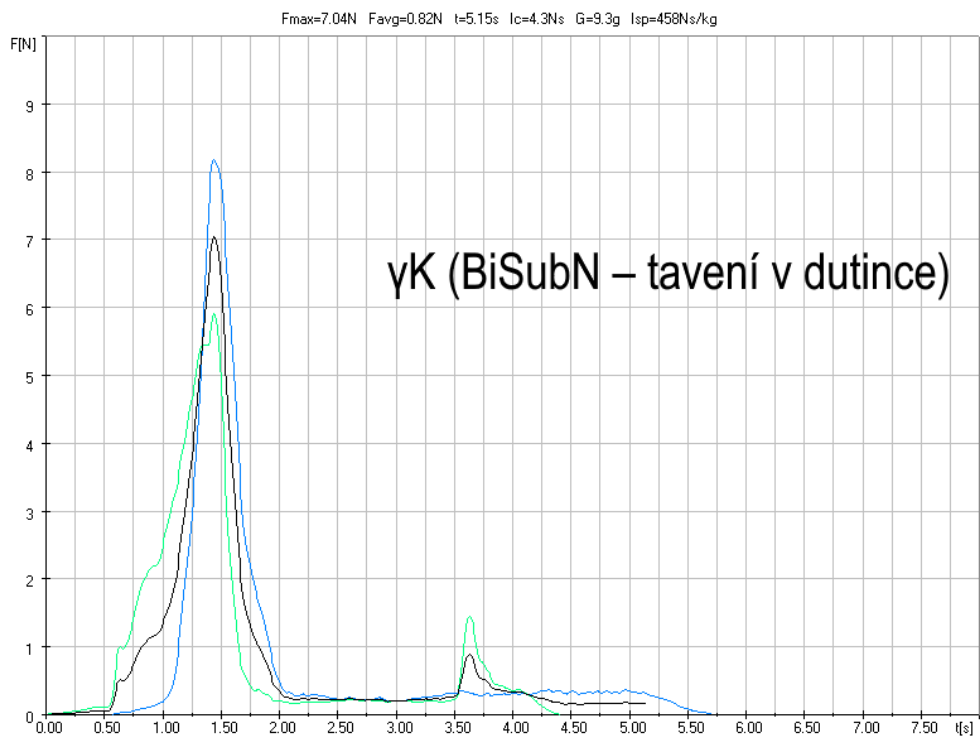
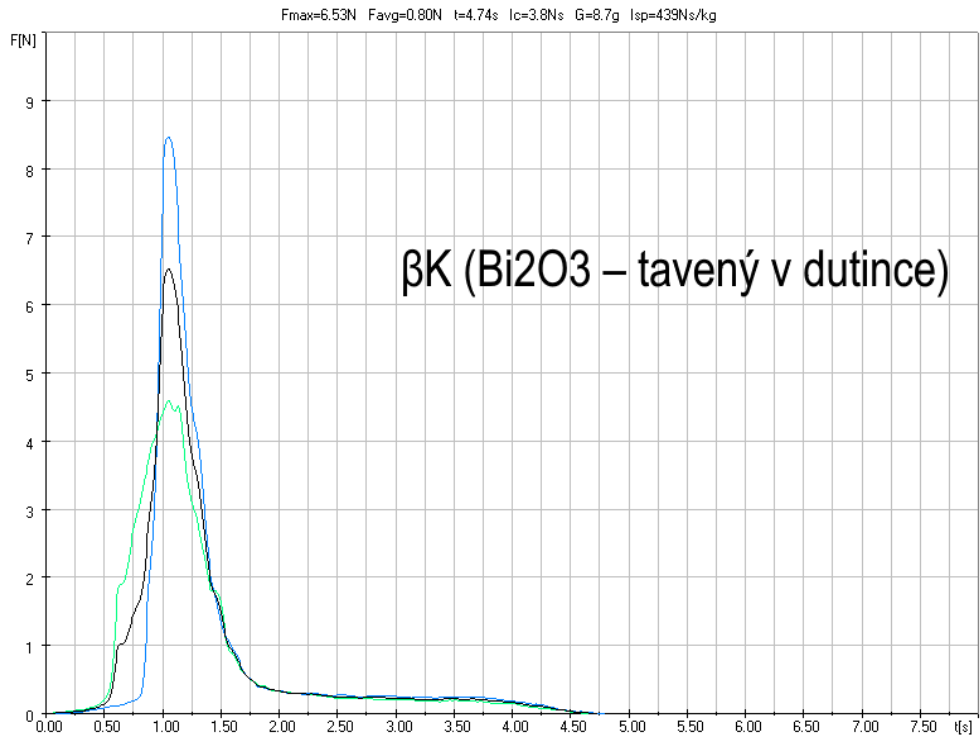


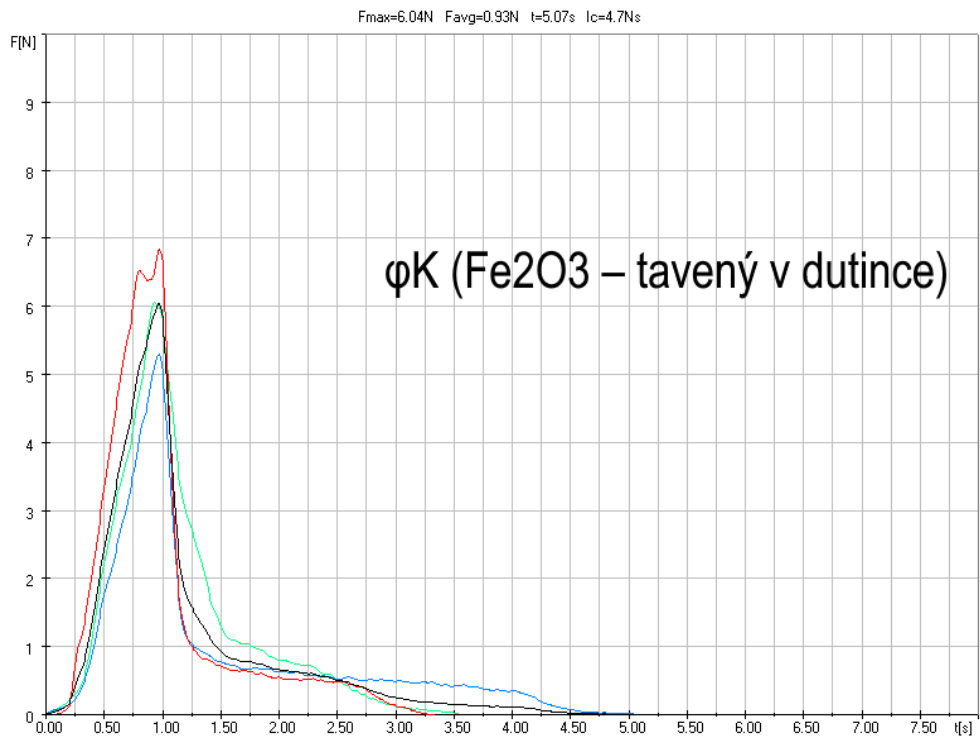
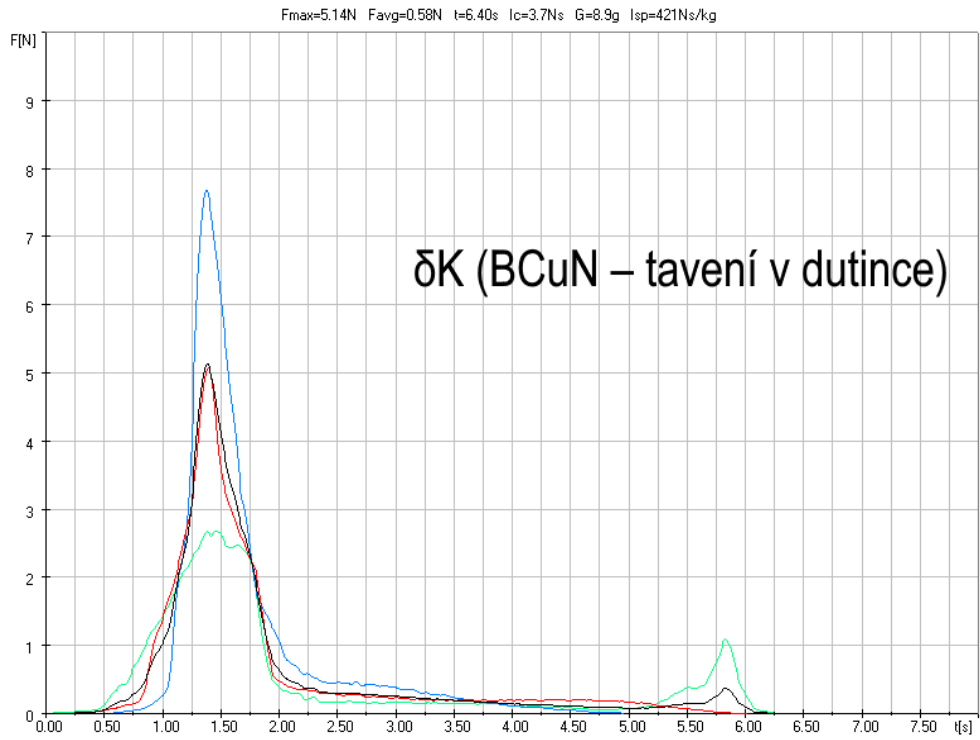


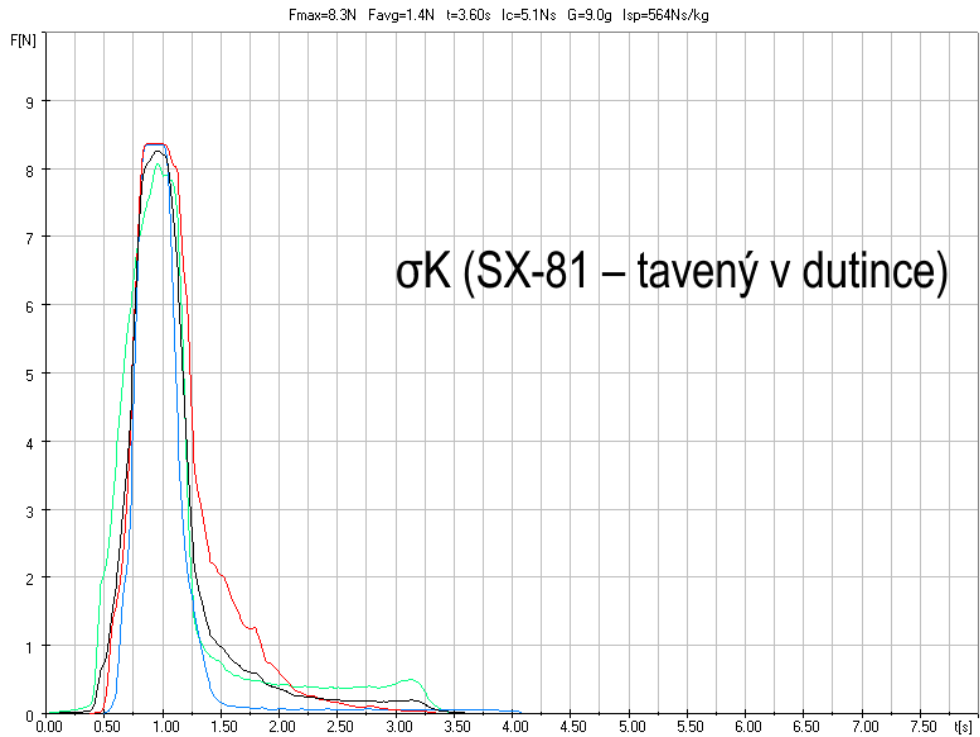


Obr. 71: Průběhy tahů motorů s litým propellentem v čase kromě SX-81 (název v grafu přidán dodatečně)

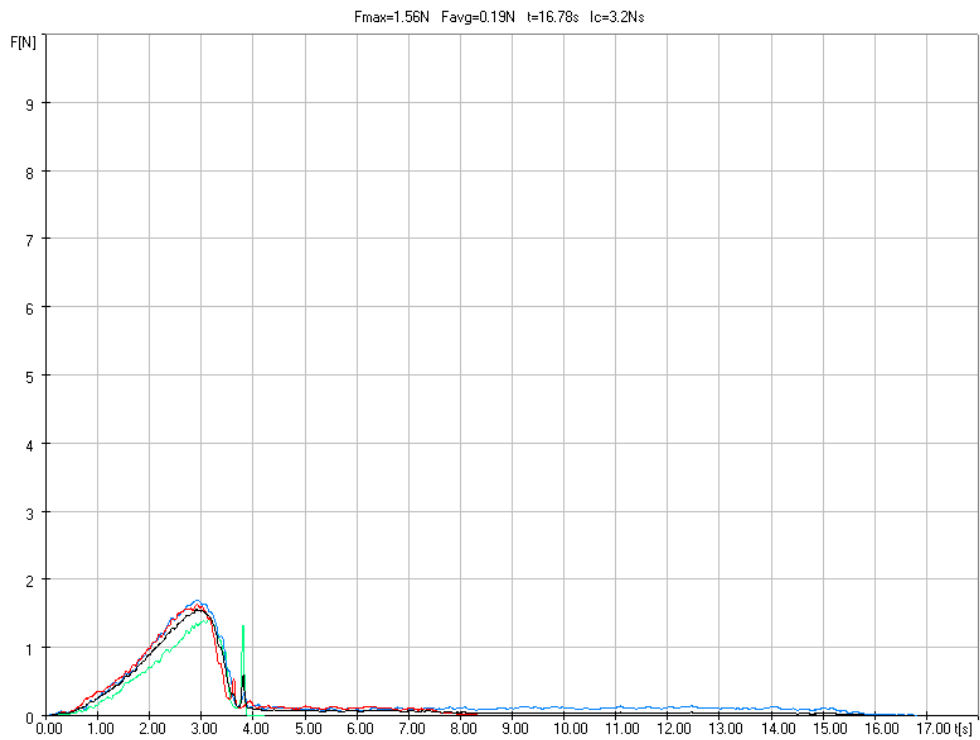








Obr. 72: Průběhy tahů motorů s propellentem taveným v dutince v čase (název v grafu přidán dodatečně)



Obr. 73: Průběhy tahů litých motorů s propellentem SX-81 v čase

5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo ověřit, jestli je možné moderátory zlepšit provozní parametry propelentu. Přičemž bylo dosaženo těchto závěrů:

Při měření bylo dosaženo cca 1/3 specifického impulsu oproti teoretickému. Příčinou jsou pravděpodobně tepelné ztráty, nevhodně navržená tryska (krátká, podexpandovaná) a nebo nedostatečně rozemleté oxidovadlo. Částičky KNO_3 mohly z trysky vylétávat dřív, než stihli zreagovat se sorbitolem. Také bylo na tryskách pozorováno, že po dohoření se na nich usazoval nezreagovaný sorbitol a stopy moderátoru. Počáteční zahrazení motorů bylo 33,3, konečné 168. To podle Obrázku 7 z kapitoly „Teorie“ odpovídá tlakům 0,5 až 2 MPa. Vzhledem k nízkým tlakům propelent v našich motorech nehořel optimálně.

U motorů plněných práškovým propelentem, který byl poté taven v dutince, se oproti litým motorům vyskytoval vyšší maximální tah. To by mohlo být způsobeno vyšší porozitou zrna. Kompozice SX-81 a KNSB + Fe_2O_3 vykazovaly vyšší specifický impuls oproti standardní kompozici (u KNSB + Fe_2O_3 o 17 % a u SX-81 více než 24 %). Motory s SX-81 (při podobné navážce jako u ostatních motorů) vykazovaly tah překračující měřicí rozsah přístroje. Ostatní moderátory oproti standardu vykazovaly malé zhoršení specifického impulsu. U zásaditého dusičnanu měďnatého měly křivky tahu velký rozptyl – malý I_{sp} mohl být způsoben chybou měření.

Lité motory měly, až na standardní kompozici, menší rozptyly křivek tahu při měření. Všechny moderátory, až na Fe_2O_3 , způsobily zlepšení specifického impulsu. To, že Fe_2O_3 vykazoval menší I_{sp} oproti ostatním moderátorům, mohlo být způsobené tím, že byl vyvářen při teplotě 110 °C a ne při 130 °C. Voda se SLESu se nestihla vyvařit a v kompozici mohla působit jako retardér hoření. Z důvodu výrazně jiného chování propelentu byl z vyhodnocení vyřazen SX-81 (ten má samostatné vyhodnocení).

Tahy a specifické impulsy sérií motorů jsou uvedeny v Tabulce 12.

Tab. 12: Průměrné tahy a specifické impulsy pro sérii raketových motorů

Metoda plnění	Tavení v dutince		
Moderátor	Standard (α)	bi2o3 (β)	BiSubN (γ)
\varnothing F [N]	5,99	6,56	6,81
\varnothing I _{sp} [Ns/kg]	451,26	441,45	461,07
Počet motorů	2	2	2
<hr/>			
Metoda plnění	Tavení v dutince		
Moderátor	BCuN (δ)	Fe2O3 (φ)	SX-81 (σ)
\varnothing F [N]	5,09	5,93	>8,3
\varnothing I _{sp} [Ns/kg]	421,83	529,74	>559,17
Počet motorů	3	3	3
<hr/>			
Metoda plnění	Lití		
Moderátor	standard (α)	bi2o3 (β)	BiSubN (γ)
\varnothing F [N]	5,89	5,58	6,25
\varnothing I _{sp} [Ns/kg]	451,26	480,69	510,12
Počet motorů	2	3	3
<hr/>			
Metoda plnění	Lití		
Moderátor	BCuN (δ)	Fe2O3 (φ)	SX-81 (σ)
\varnothing F [N]	4,97	4,56	1,69
\varnothing I _{sp} [Ns/kg]	461,07	441,45	333,54
Počet motorů	3	2	1

6 DISKUZE VÝSLEDKŮ A NÁVRH BUDOUCÍCH EXPERIMENTŮ

Na základě dosaženého specifického impulsu by cílem budoucího experimentu mohlo být přiblížení se k teoretickému impulsu KNSB. Toho by bylo docíleno použitím motoru s většími rozměry a lépe zkonstruovanou tryskou.

Speciálním případem byl propelent SX-81 plněný metodou lití. Ten, oproti pěstované variantě, vykazoval zhoršení I_{sp} o 42 %. Není pravděpodobné, že tento pokles byl způsoben přítomností nevyvařené vody – množství je příliš malé. Skutečná příčina není známá (možné přičinění lidského faktoru). Další experiment by mohl prozkoumat tuto anomálii.

U litých motorů s kompozicí SX-81 se projevovaly také výkyvy specifického impulsu (v rozmezí cca 100 Ns/kg). Ty byly vypočítávány navázkou před a po měření, viz následující odstavce. Jejich křivky tahu jsou však podobné.

Vliv na výsledky by také mohly mít jinak provedené navázky propelentů. U všech kompozic kromě standardní a s Bi_2O_3 byly dodatečně provedeny navázky motoru před a po statickém zážehu (před = bez zápalnice a BKNO_3). Ty se oproti použitým lišily o úbytek cca 0,3 g. Tento úbytek by mohl představovat vyvrtný kanál v motoru.

Pro odlišné vlivy moderátorů na propelenty připravené jinou metodou ke dni zpracování práce není známo skutečné a ani možné vysvětlení.

7 POUŽITÁ LITERATURA

1. Solid-propellant rocket. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-propellant_rocket
2. *Svaz modelářů České republiky* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.svazmodelaru.cz/>
3. Raketové modelářství v českých zemích – historie. *Kosmo.cz* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.kosmo.cz/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=1173>
4. Interview s Dr. Janem Zigmundem. *Minimakety.cz* [online]. Minimakety.cz, c2007-2019 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <http://minimakety.cz/rapier/other/Interview-2007/index.php>
5. Ammonium perchlorate composite propellant. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium_perchlorate_composite_propellant
6. Amateur rocketry. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Amateur_rocketry
7. KNSB Propellant. *Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site* [online]. Nakka, 1997 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.nakka-rocketry.net/sorb.html>
8. MOODY, Kylar J., et al. Development of sorbitol-based solid rocket motors for propulsion education. In: *AIAA Scitech 2020 Forum*. 2020. p. 0067.
9. Solid Propellant Burn Rate. *Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site* [online]. Nakka, 1997 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: 9. <https://www.nakka-rocketry.net/burnrate.html>
10. Thermal Protection for Rocket Motor Casings. *Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site* [online]. Nakka, 1997 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <http://nakka-rocketry.net/therm.html#Introduction>
11. Overview. *Jacob's Rocketry* [online]. Jacob [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://jacobsrocketry.com/rocketry_overview.htm
12. Nozzle Design. Kostas Makris [online]. Kostas Makris, c2023 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.k-makris.gr/nozzle-design/>
13. Kosmonautika XVI – Raketové motory. *Hvězdárna Vsetín* [online]. Hvězdárna Vsetín, c2006-2023 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <http://www.hvezdarna-vsetin.cz/pages/view1dd8.php>

14. Solid Rocket Motor Theory -- Propellant Grain. *Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site* [online]. Nakka, 1997 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://www.nakka-rocketry.net/th_grain.html
15. Rocket Motor Design Charts - Chamber Pressure -. *Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site* [online]. Nakka, 1997 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://nakka-rocketry.net/design1.html>
16. Solid Rocket Motor Theory -- Chamber Pressure. *Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site* [online]. Nakka, 1997 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://nakka-rocketry.net/th_pres.html
17. KOBEŠ, Luboš. *Nové druhy TPH*.
18. Přehled raketových motorů. *Astra* [online]. ASTRA [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.astramodel.cz/cz/blog/prehled-raketovych-motoru.html>
19. ZIGMUND, Jan. *Rapier - katalog motorů*.
20. ZIGMUND, Jan. *Rapier: 10 let firmy*. Pardubice, 2008.
21. Sorbitol. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sorbitol>
22. Sorbitol. *PubChem* [online]. Bethesda (MD): National Library of Medicine [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sorbitol>
23. Potassium nitrate. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Potassium_nitrate
24. Combustion. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Combustion>
25. ROVNICE: The Flowing System Gasdynamics. Part 3: Saint-Venant - Wantzel formula modern form. Cornell University [online]. Ithaca, New York: Cornell University [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/physics/0302038>
26. MIŠOŇ, Karel a Zdeněk PÍRKO. *Základy astronautiky*. Praha: Academia, 1974. Cesta k vědě (Academia).
27. BROWN, Edwin. *An Introduction to PROPEP, A Propellant Evaluation Program for Personal Computers* [online]. Rockvale (CO), 1995 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: http://www.jpyro.co.uk/wp-content/uploads/j01_11_htfsr.pdf
28. Copper;hydroxide;nitrate. *PubChem* [online]. Bethesda (MD): National Library of Medicine [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/187887>
29. 1304-85-4. *Chemical Book* [online]. ChemicalBook, c2016 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://www.chemicalbook.com/CASEN_1304-85-4.htm

30. Boron Carbide (B₄C). *NIST-JANAF Thermochemical Tables* [online]. NIST, c2013 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://janaf.nist.gov/tables/C-008.html>
31. Boron carbide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Boron_carbide
32. Carbon. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon>
33. Bismuth(III) oxide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth\(III\)_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth(III)_oxide)
34. Bismuth(III) oxide (data page). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth\(III\)_oxide_\(data_page\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth(III)_oxide_(data_page))
35. Dusičnan bis(dikyandiamid) měďnatý. In: JALOVÝ, Zdeněk. *SYNTÉZY A VLASTNOSTI LÁTEK NAVRŽENÝCH PRO GENERÁTORY PLYNŮ*. Pardubice, 2002, s. 18.
36. Copper(II) oxide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Copper\(II\)_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Copper(II)_oxide)
37. Copper Oxide (CuO). *NIST-JANAF Thermochemical Tables* [online]. NIST, c2013 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://janaf.nist.gov/tables/Cu-015.html>
38. Iron(III) oxide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(III\)_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Iron(III)_oxide)
39. Iron Oxide, Hematite (Fe₂O₃). *NIST-JANAF Thermochemical Tables* [online]. NIST, c2013 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://janaf.nist.gov/tables/Fe-030.html>
40. Iron(II,III) oxide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(II,III\)_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Iron(II,III)_oxide)
41. Iron Oxide, Magnetite (Fe₃O₄). *NIST-JANAF Thermochemical Tables* [online]. NIST, c2013 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://janaf.nist.gov/tables/Fe-032.html>
42. Potassium perchlorate. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Potassium_perchlorate
43. Sulfur. *PubChem* [online]. Bethesda (MD): National Library of Medicine [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5362487>

44. Lead(II,IV) oxide. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lead%28II%2CIV%29_oxide
45. Lead Oxide (Pb3O4). *NIST-JANAF Thermochemical Tables* [online]. NIST, c2013 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://janaf.nist.gov/tables/O-070.html>
46. Towards understanding the catalytic properties of lead-based ballistic modifiers in double base propellants. *The Royal Society of Chemistry's Journals, Books and Databases* [online]. Royal Society of Chemistry, c2023 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/cp/d0cp05172a>
47. TPH SX-81. *Malé raketové motory na TPH* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <http://raketky.x2u.cz/fs.php>
48. Kanagom Klasika. *Druchema* [online]. Druchema, c2022 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.druchema.cz/z4118-kanagom-klasika>
49. Eger [online]. ALBERT EGER, c2019 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://eger-huelsen.de/>
50. PU501HR – PH27. *ELCHEMCo* [online]. Zruč nad Sázavou: ELCHEMCo, c2023 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <http://www.elchemco.cz/zbozi/10/pu501hr--ph27/>
51. Pyrotechnic initiator. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pyrotechnic_initiator
52. osobní sdělení Ing. Jan Zigmund, 15. 3. 2023

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Podélný řez modelářského motoru na TPH s popisem	8
Obrázek 2: Schéma trysky raketového motoru [12]	9
Obrázek 3: Tvary kanálů u zrna TPH a jejich vliv na průběh hoření [14]	9
Obrázek 4: Podélný řez motoru s vyznačením ploch pro výpočet zahrazení	10
Obrázek 5: Závislost tlaku v motoru na čase [15]	10
Obrázek 6: Závislost specifického impulsu a teploty na tlaku ve spalovací komoře [17]	11
Obrázek 7: Závislost tlaku ve spalovací komoře na zahrazení pro propelent KNSB [17]	11
Obrázek 8: Podélný řez motoru se zpožďovací složi a výmetem [18]	12
Obrázek 9: Porovnání propelentů a jejich specifických impulsů [51]	12
Obrázek 10: Vliv působení zvýšené teploty na sorbitol [7]	13
Obrázek 11: Molekula sorbitolu [21]	14
Obrázek 12: Závislost specifického impulsu a teploty na poměru sorbitolu a KNO_3 [17]	14
Obrázek 13: Vliv velikosti částic oxidovadla na rychlosti hoření [9]	15
Obrázek 14: Ukázka výstupu programu ZPEP (žlutě zvýrazněné důležité údaje – doděláno ručně)	16
Obrázek 15: Molekula zásaditého dusičnanu měďnatého (BCuN) [28]	17
Obrázek 16: Molekula zásaditého dusičnanu bismutitého (BiSubN) [29]	17
Obrázek 17: Molekula měďnatého komplexu [dusičnan bis(dikyandiamid) měďnatý] [33]	18
Obrázek 18: Závislost rychlosti hoření na tlaku s popisky oblastí [46]	19
Obrázek 19: Souprava nástrojů pro lisování zkušebních vzorků	20
Obrázek 20: Vzorky s moderátory testované v 1. experimentu	21
Obrázek 21: Testování vzorku Bi_2O_3 s kartonovou deskou (4. experiment)	22
Obrázek 22: Připravené vzorky s ochrannou vrstvou (5. experiment)	23
Obrázek 23: Vzorek Fe_2O_3 2 % s hořící zápalnicí (5. experiment)	23
Obrázek 24: Zapalování vzorku Fe_2O_3 2 % pomocí doutnáku (5. experiment)	23
Obrázek 25: Zapalování vzorku BCuN plynovým hořákem (2. experiment)	23

Obrázek 26: Program Adobe Premiere s importovanými záznamy z měření pro změřením maximální výšky plamene a jeho šířku (5. experiment).....	25
Obrázek 27: Časosběrný údaj v programu (5. experiment).....	25
Obrázek 28: Nejvyšší plamen vzorku BiSubN	27
Obrázek 29: Nejvyšší plamen vzorku SX-81	27
Obrázek 30: Papírová dutinka EGER	28
Obrázek 31: Kaolínový granulát pro lisování trysek frakce 0,315 – 0,7 mm	29
Obrázek 32: Souprava nástrojů pro lisování trysek	29
Obrázek 33: Dutinka s nalisovanou tryskou – pohled ze strany a seshora.....	30
Obrázek 34: Vyplněný formulář pro sérii motorů pz.2303.A.ZφLP.A	31
Obrázek 35: Mlýnek použitý k mletí KNO ₃ a sorbitolu	33
Obrázek 36: Moderátory připravené v třech miskách na drcení.....	33
Obrázek 37: Váha použitá k navážkám složek propelentu	34
Obrázek 38: Vážení složek propelentů (kompozice s moderátory BiSubN a BCuN)....	34
Obrázek 39 Propelenty SX-81 a KNSB + Fe ₂ O ₃ v sušárně připravené k tavení.....	35
Obrázek 40: Roztavené kompozice KNSB (nalevo SX-81 a KNSB + Fe ₂ O ₃ , napravo KNSB + BiSubN)	35
Obrázek 41: Roztavená kompozice KNSB + BCuN	36
Obrázek 42: Zkumavka se SLESem	36
Obrázek 43: Množství přidávaného SLESu na špejli	37
Obrázek 44: Ztekucený propelent s přidaným SLESem	37
Obrázek 45: Lití propelentu KNSB s BCuN do dutinky	38
Obrázek 46: Práškové formy KNSB v mlýnku před mletím (BCuN nalevo a Fe ₂ O ₃ napravo).....	39
Obrázek 47: Prášková forma SX-81 v mlýnku po mletí.....	39
Obrázek 48: 3D vytištěné píсты	40
Obrázek 49: Píst v dutince	40
Obrázek 50: Práškový propelent KNSB s BCuN nalevo a Fe ₂ O ₃ napravo	40
Obrázek 51: Násypka pro dávkování práškového propelentu BCuN	40
Obr. 52: Práškový KNSB s BiSubN – 1. upěchovaná vrstva nalevo a 2. vrstva nasypaná k upěchování napravo	41
Obrázek 53: Dutinky v sušárně s práškovým KNSB + Fe ₂ O ₃ a SX-81 připraveným na tavení	41

Obrázek 54: Mističky ve tvaru lodiček k odlévání polyuretanu do motorů	42
Obrázek 55: Použité hmoty pro zavíčkování motoru – PU a polykyanát (tvrdidlo)	42
Obrázek 56: Lití polyuretanu do motorů = „víčkování“	43
Obrázek 57: Zkumavka s BKNO ₃	44
Obrázek 58: Použitá komerční zápalnice.....	44
Obrázek 59: Dávkování BKNO ₃ do motoru	45
Obrázek 60: Motory připravené k měření.....	45
Obrázek 61: Základna s tenzometrem	45
Obrázek 62: REDALS	45
Obrázek 63: Kompletní sestava komponent potřebná k měření a zpracování záznamů.....	46
Obrázek 64: Zapalování motoru s moderátorem BiSubN, metoda tavení TPH v dutince, pořadové číslo 3	46
Obrázek 65: Plamen motoru s propelentem SX-81, metoda tavení TPH v dutince, pořadové číslo 1	47
Obrázek 66: Zapálená zápalnice u motoru s moderátorem Fe ₂ O ₃ , metoda tavení TPH v dutince, pořadové číslo 3.....	47
Obrázek 67: Rozhraní programu RECON po načtení záznamu z mezipaměti REDALSu (PZ.2303.A.ZφK1.A.1)	48
Obrázek 68: Rozhraní programu RECON po spuštění.....	48
Obrázek 69: Výchozí hodnoty pro rozměry grafu	49
Obrázek 70 Rozhraní RECONu po načtení několika záznamů	50
Obrázek 71: Průběhy tahů motorů s litým propelentem v čase kromě SX-81 (název v grafu přidán dodatečně).....	51–53
Obrázek 72: Průběhy tahů motorů s propelentem taveným v dutince v čase (název v grafu přidán dodatečně).....	53–56
Obrázek 73: Průběhy tahů litých motorů s propelentem SX-81 v čase	56

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní vlastnosti paliva a oxidovadla	13
Tabulka 2: Moderátory a jejich značení (*kompozice propelentu → KNO ₃ : sorbitol : KClO ₄ = 60 : 35 : 5; **složka kompozice SX-81 – vysvětleno později)	17
Tabulka 3: Moderátory a jejich vlastnosti + zdroje	18
Tabulka 4: Účast vzorků v experimentech č. 1 až 5 (číslo u vzorku = počet změřených vzorků při experimentu)	24
Tabulka 5: Časy hoření vzorků v 1. experimentu	26
Tabulka 6: Výšky plamenů z 5. experimentu (...v čase = hodnota časosběrného údaje ve střihacím programu)	26
Tabulka 7: Poměry látek ve hmotě pro trysky na bázi geopolymery (samostatně poměry geopolymery a poměr geopolymery : šamot pro hmotu na trysku)	30
Tabulka 8: Legenda značení a atribut v názvu série motorů	32
Tabulka 9: Legenda ostatních atribut a značek ve formuláři	32
Tabulka 10: Procentuální zastoupení látek v propelentech (vlevo – standard + moderátor; vpravo – SX-81)	33
Tabulka 11: Použité navážky propelentů pro výpočet Isp pro každou sérii motorů.....	49
Tabulka 12: Průměrné tahy a specifické impulsy pro série raketových motorů.....	58