

Hoření vpichovaných netkaných textilií

Diplomová práce

Studijní program:

N3106 Textilní inženýrství

Studijní obor:

Netkané a nanovláknenné materiály

Autor práce:

Bc. David Včeliš

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D.

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů





Zadání diplomové práce

Hoření vpichovaných netkaných textilií

Jméno a příjmení: **Bc. David Včeliš**
Osobní číslo: T18000294
Studijní program: N3106 Textilní inženýrství
Studijní obor: Netkané a nanovláknenné materiály
Zadávací katedra: Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou hořlavosti netkaných textilií obecně. Vypracujte rešerši.
2. Navrhněte postup výroby netkané textilie s různým obsahem hořlavých a nehořlavých vláken o různých objemových hmotnostech.
3. Takto vyrobené vzorky dle norem testujte na hořlavost. Sledujte čas hoření a hmotnostní úbytky.
4. Diskutujte výsledky a navrhněte další postupy řešení daného problému.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
40-60 dle potřeby
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. W. Albrecht, H. Fuchs, W. Kittelmann: Nonwovens Fabrics, Wiley-VCH, Weinheim 2003, ISBN: 3-527-30406-1
2. RUSSELL, Edited by S.J. Handbook of nonwovens. Boca Raton, Fla. [etc.] :Cambridge: CRC press ; Woodhead, 2007. ISBN 978-185-5736-030.
3. Jirsák, O., Wadsworth, L.C. Nonwoven Textiles, Carolina Academic Press, Durham, NC 1999, ISBN 0-89089-978-8

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D.
Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání práce:

20. února 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

15. května 2020

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

L.S.

Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

26. května 2020

Bc. David Včeliš

Tímto bych chtěl poděkovat panu doktoru Jiřímu Chaloupkovi za cenné rady a za vedení této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Filipu Sanetníkovi za poskytnuté vybavení, panu doktoru Luboši Běhálkovi za možnost použití termogravimetrické analýzy. Nakonec děkuji i mé rodině za podporu.

Anotace

Cílem této diplomové práce je zhodnotit vliv změny objemové hustoty netkané textilie vyrobené vpichovací technologií a vliv změny poměru vláken ve směsi, na její vlastní hoření. Testování probíhalo dle dvou norem zároveň a to: VW 01000 (PV 3357) a ISO 3795. Po odhalení trendu, byla vyrobena řada objemových hmotností, které je technologie vpichování v poloprovoze katedry netkaných a nanovlákných materiálů ještě schopna vyrobit, aby byl zmapován, pokud možno celý průběh trendu hoření. K analýze vláken byla použita obrazová a termogravimetrická analýza, která měla podhalit chování plamene.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hoření, netkané textilie, vpichování, PANOX, viskóza, panoxová vlákna, viskózová vlákna, spalovací zkouška.

Annotation

The aim of this diploma thesis is to evaluate the effect of changes in the bulk density of nonwovens produced by needling technology and the effect of changes in the ratio of fibers in the mixture, on its own burning. Testing was carried out according to two standards at the same time: VW 01000 (PV 3357) and ISO 3795. After the trend was revealed, a number of bulk densities were produced, which the needling technology is still able to produce in the pilot plant of the Department of Nonwoven and Nanofibrous Materials in order to map as much as possible the course of the combustion trend. Image and thermogravimetric analysis were used to analyze the fibers to reveal the flame behavior.

KEYWORDS

Burning, nonwovens, needling, PANOX, viscose, panox fibers, viscose fibers, combustion test.

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam jednotek a zkratk | 9 |
| 1 Úvod..... | 11 |
| 2 Teoretická část | 12 |
| 2.1 Vymezení základních textilních pojmů | 12 |
| 2.1.1 Vlákno..... | 12 |
| 2.1.2 Netkaná textilie | 13 |
| 2.2 Použité materiály | 14 |
| 2.2.1 PANOX® vlákna | 14 |
| 2.2.2 Viskózoová vlákna..... | 16 |
| 2.3 Technologie netkaných textilií..... | 18 |
| 2.3.1 Proces mykání..... | 20 |
| 2.3.2 Příčné kladení | 21 |
| 2.3.3 Technologie vpichování..... | 22 |
| 2.4 Proces hoření..... | 23 |
| 2.4.1 Teplota | 23 |
| 2.4.2 Odpařování látek..... | 24 |
| 2.4.3 Teplota vzplanutí | 25 |
| 2.4.4 Teplota hoření | 25 |
| 2.4.5 Teplota vznícení..... | 25 |
| 2.4.6 Samovznícení..... | 26 |
| 2.4.7 LOI (LKČ) | 27 |
| 2.4.8 Hoření | 27 |
| 2.4.9 Zkoušení hořlavosti textilií | 29 |
| 2.4.9.1 ISO 3795..... | 29 |
| 2.4.9.2 VW 01000 (PV 3357)..... | 31 |

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 3 | Praktická část | 32 |
| 3.1 | Příprava vzorků..... | 32 |
| 3.2 | Testování hořlavosti..... | 35 |
| 3.3 | Rozvoj testovací řady..... | 36 |
| 3.4 | Obrazová analýza..... | 37 |
| 3.5 | Termogravimetrická analýza | 40 |
| 4 | Vyhodnocení..... | 41 |
| 4.1 | TGA | 41 |
| 4.1.1 | Viskóza | 41 |
| 4.1.2 | PANOX..... | 42 |
| 4.2 | 100V..... | 43 |
| 4.3 | 75V 25P | 46 |
| 4.4 | 50V 50P | 49 |
| 4.5 | 25V 75P | 51 |
| 4.6 | 100P | 51 |
| 5 | Závěr | 52 |
| 6 | Použitá literatura | 54 |
| 7 | Přílohy..... | 56 |

Seznam jednotek a zkratek

| | | | |
|----------------|----------------|------------------|-------------------------------------|
| dtex | decitex | NT | netkaná textilie |
| μm | mikrometr | vpich. | vpichovaný |
| mm | milimetr | MS | mykací stroj |
| cm | centimetr | PAN | polyakrylonitril |
| m | metr | PANOX | zoxidovaný polyakrylonitril |
| m ² | metr čtvereční | VS | viskóza |
| m ³ | metr krychlový | PPS | průměrný polymerační stupeň |
| km | kilometr | NaOH | hydroxid sodný |
| mg | miligram | CO | oxid uhelnatý |
| g | gram | CO ₂ | oxid uhličitý |
| kg | kilogram | CS ₂ | sulfid uhličitý |
| ml | mililitr | HCl | kyselina chlorovodíková |
| Pa | pascal | HCN | kyanovodík |
| hPa | hektopascal | H ₂ O | voda |
| MPa | megapascal | LKČ | limitní kyslíkové číslo |
| cN | centinewton | LOI | limiting oxygen index |
| N | newton | TGA | termogravimetrická analýza |
| s | vteřina | TG | termogravimetrická křivka |
| min | minuta/minimum | DTG | derivační termogravimetrická křivka |
| max | maximum | | |

| | | | |
|------|--------------------|-------|------------------|
| K | kelvin | atp. | a tak podobně... |
| °C | stupně Celsia | cca | cirka |
| °F | stupně Fahrenheita | hmot. | hmotnost |
| č. | číslo | inf. | inflexní |
| ad. | a další... | tzv. | tak zvaný |
| atd. | a tak dále... | tzn. | to znamená |

1 Úvod

Hoření je z fyzikálního hlediska reakce, při které dochází k oxidaci materiálu a ke vzniku světla a tepla. V mnoha oblastech použití netkaných textilií jsou tyto textilie více, či méně tepelně namáhány. V některých případech by mohlo dojít i ke vznícení materiálu, a tak jsou na textilie aplikovány nehořlavé zátěry, impregnace, nebo jsou netkané textilie přímo vyrobené z nehořlavých vláken.

Hlavními cíli této diplomové práce bylo zjistit vliv změny poměru mísení mezi vysoce hořlavými a nehořlavými vlákny na proces hoření. Dále byla měněna i objemová hmotnost materiálů. Všechny vzorky byly vyrobeny technologií vpichování a byly testovány dle dvou různých norem. Sledován byl zejména čas hoření a hmotnostní úbytek.

V teoretické části budete seznámeni s použitými materiály, technologií přípravy vzorků a se samotným procesem hoření. Samotný proces hoření bude probrán co nejpodrobněji.

V experimentální části bude rozebrán celý postup přípravy a testování krok za krokem. Tedy příprava vzorků, testování hořlavosti dle norem, obrazová analýza a termogravimetrická analýza materiálů, která měla pomoci vysvětlit nalezené trendy.

Vyhodnocení bude poslední částí této práce, kde budou reprezentovány výsledky z měření a analýz.

2 Teoretická část

V této části budou popsány veškeré potřebné znalosti k pochopení praktické části. Nejprve bude vysvětlen základní textilní útvar, jímž je vlákno, jeho úloha a atributy ve vlákenné struktuře. Jmenovitě v netkané textilií zpevněné vpichovací technologií. Dále budou charakterizovány použité materiály a jejich vztah k hoření. V závěru tohoto úseku bude podrobně rozebrán proces hoření a vybrané normy pro určení hořlavosti materiálů.

2.1 Vymezení základních textilních pojmů

2.1.1 Vlákno

Vlákno patří do skupiny délkových textilií. Charakteristické je tím, že délka mnohonásobně převyšuje jeho průměr (v případě nekruhového průřezu šířku a tloušťku). Zpravidla je velmi pružné a ohebné, což umožňuje tento útvar zpracovávat do struktur vyšších řádů. Těmito vyššími strukturami jsou myšlené: pavučiny, prameny, příze, tkaniny, pleteniny, netkané textilie atp. V těchto textilních útvarech jsou vlákna do sebe vzájemně zauzlována, propletena, zaklesnuta (v případě živočišných vláken), či jsou spojeny pojivem. Velkou část na udržení konstrukce textilie mají třecí síly mezi vlákny. [1,2]

Vlákna jsou rozdělována dle různých hledisek. Za základní aspekt je považován původ vláken, jenž se rozděluje do následujících skupin:

- přírodní,
 - rostlinná,
 - ze semen,
 - z listů,
 - z plodů,
 - živočišná,
 - keratinová,
 - fibroinová,
- chemická,
 - z přírodních polymerů,
 - ze syntetických polymerů,
- hutnická. [2]

Dále je významnou charakteristikou vláken jejich délka, jemnost a průřez. V případě délky vláken mohou nastat tři případy, a to:

- nespřadatelná (délka pod 10 mm),
- staplová (délka obvykle mezi 10–120 mm),
- nekonečná. [1,2]

Jemnosti vláken jsou druhým důležitým základním parametrem vláken. Jemnost má speciální textilní jednotku „**tex**“ a je definována poměrem mezi hmotností vlákna v gramech a délkou vlákna v kilometrech. Vlákná mají jemnosti obvykle v jednotkách „**decitex**“. Tex však není jedinou soustavou pro vyjádření jemnosti. Ve světě jsou využívány i systémy jako: titr denier, číslo metrické a číslo anglické. Nicméně jednotka tex je využívána nejvíce. Zápis vzorce pro jemnost v systému pro tex vypadá takto:

$$T = \frac{m}{l}, \quad (1)$$

kde T = jemnost [tex], m = hmotnost [g] a l = délka [km]. [1,2]

Průřezy vláken mohou nabývat obrovského množství nejrůznějších tvarů, jejichž řádné vyjmenování by ani nebylo možné, a proto zůstaneme u nejjzákladnějšího rozdělení na **kruhový** a **nekruhový** průřez. V rozdělování vláken dle různých aspektů by bylo možné pokračovat i dále například mechanickými, termickými, elektrickými a povrchovými vlastnostmi, což jsou rozhodně důležitá hlediska, ale pro účely této práce jsou dostačující již zmíněné informace. [2]

2.1.2 Netkaná textilie

Toto je příklad vyšší textilní struktury, jejichž obsah je tvořen vlákny. Samotná definice NT vychází z normy ČSN EN ISO 9092 (800002), která zní:

„Netkané textilie jsou struktury z textilních materiálů, jako jsou staplová vlákna, nekonečná vlákna nebo vlákna příze bez ohledu na jejich typ nebo původ, z kterých bylo vytvořeno rouno jakýmkoliv způsobem, s výjimkou provázání nití jako u tkanin, pletenin, krajek, proplétaných nebo všívaných textilií.“ [3]

2.2 Použité materiály

V této práci byly aplikovány dva typy materiálu, které byly míseny do vpichované netkané textilie. Jsou to PANOX a viskóza. Byly vybrány z důvodu, že zmíněné materiály jsou extrémní volbou pro proces hoření. PANOX zastupuje zcela nehořlavý materiál, ale naopak viskóza vysoce hořlavý materiál. Obě suroviny jsou snadno zpracovatelné textilními postupy pro výrobu netkané vpichované textilie. Vzhledem k tomu, že rovněž oba druhy vláken patří do skupiny chemických vláken (jsou tedy uměle vyráběné), tak je zamezeno výkyvům ve vlastnostech materiálu, jako je tomu například u přírodních vláken.

2.2.1 PANOX® vlákna

PANOX patří do skupiny chemických vláken ze syntetických polymerů. Tato speciální textilní vlákna jsou oxidovaná a tepelně stabilizovaná polyakrylonitrilová vlákna. Jsou známá po celém světě pod značkou „PANOX®“ a v mnoha průmyslových odvětvích se osvědčila jako ideální materiál pro ohnivzdorné výrobky. Vlákna se používají například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, energetickém průmyslu a v mnoha dalších průmyslových aplikacích. [4,5]

Automobilový průmysl

- Tepelné izolace
- Akustické izolace
- Komponenty převodovky
- Protipožární izolace
- Izolační plsti a textilie
- Izolace motorového prostoru
- Třecí obložení
- Brzdové destičky

Průmyslové aplikace

- Ohnivzdorné oděvy
- Plsti, tkaniny, NT a příze
- Chemicky odolné textilie
- Železniční interiéry
- Ocelářský průmysl
- Brzdové systémy výtahu

Letectví

- Protipožární textilie pro sedadla letadel a interiéry kabin
- C/C brzdové destičky

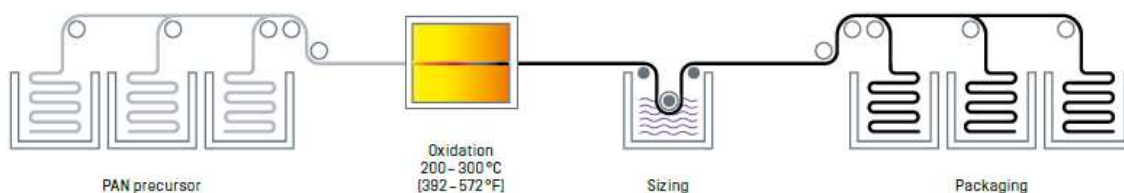
Vlákna PANOX vyrábí firma SGL Carbon tepelnou stabilizací polyakrylonitrilu při 300 °C. Výsledkem jsou oxidovaná textilní vlákna se stabilizovanou chemickou strukturou a obsahem uhlíku přibližně 62 %. Díky tomu dosahuje hodnot limitního kyslíkového čísla (**viz 2.4.7 LOI (LKČ)**) větší než 45 %. Z toho vyplývá, že vlákna jsou vysoce odolná vůči působení plamene a tedy nehoří. Vlákna se netaví, ani neškvaří. To zajišťuje nejlepší možnou ochranu pro uživatele a firmou vyráběné produkty splňují požární třídu S-a v DIN 66083 pro ochranné pracovní oděvy. Kromě toho mají vlákna dobré izolační vlastnosti, a to díky nízké tepelné vodivosti materiálu. [4,5]

Vlákna PANOX jsou univerzální a lze je snadno použít v celé řadě textilních procesů k výrobě vysoce výkonných, nehořlavých a izolačních tkanin, či netkaných textilií. Tepelně stabilizovaná vlákna jsou kromě vysoké tepelné odolnosti, také velmi odolná vůči chemikáliím a rovněž mohou dobře fungovat jako elektrický izolant. [4]

Zmíněná firma tato vlákna vyrábí v několika formách:

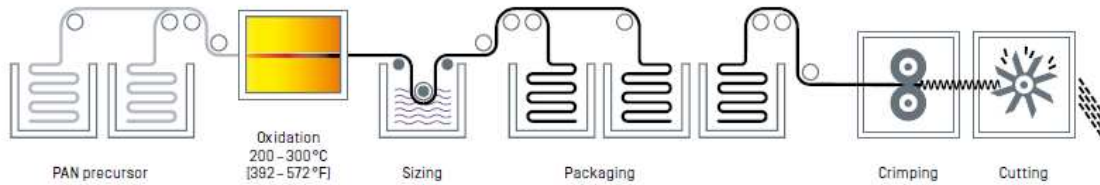
- nekonečná vlákna,
- staplová vlákna,
- obloučkovaná staplová vlákna,
- mletá vlákna. [4]

Nekonečná vlákna se dodávají jako 320 000 vláknitý svazek s aplikovaným speciálním lubrikačním přípravkem. V této formě jsou dodávány ve dvou různých jemnostech (1,7 a 2,2 dtex). [4]



Obrázek č. 1 – Schéma výroby PANOX ve formě nekonečných vláken [4]

Obloučkovaná vlákna jsou vyrobena přímo z nekonečného vlákna. Dodávána jsou s naneseným lubrikantem, který zajišťuje antistatickou úpravu. Spolu s pečlivě optimalizovanou úrovní obloučkování je zajištěno, že procesy jako například mykání (**viz 2.3.1 Proces mykání**) probíhají nepřetržitě a spolehlivě. [4]



Obrázek č. 2 – Schéma výroby ve formě obloučkových staplových vláken [4]

Neobloučkováná staplová vlákna se používají do kompozitů, aby poskytovala strukturovaný vzhled povrchu vnitřním komponentům v automobilovém, železničním a námořním průmyslu. Kromě zlepšení kosmetického vzhledu těchto povrchů zlepšuje vlákno PANOX také protipožární a chemickou odolnost těchto částí. [4]

Mletá vlákna se používají rovněž v kompozitních materiálech. Jsou vynikající alternativou k nebezpečnějším materiálům, jako je například azbest. Mezi typické aplikace patří automobilové brzdové destičky, vysoce výkonné brzdové destičky pro motorové sporty, brzdová obložení pro vlaky a třecí obložení pro výtahy. [4]

Číselného vyjádření některých vlastností:

- hustota 1 370 kg/m³,
- prodloužení při přetrhu 22 %,
- pevnost v tahu 230 MPa,
- LOI >45 %,
- navlhavost 5-10 %. [4]

2.2.2 Viskózová vlákna

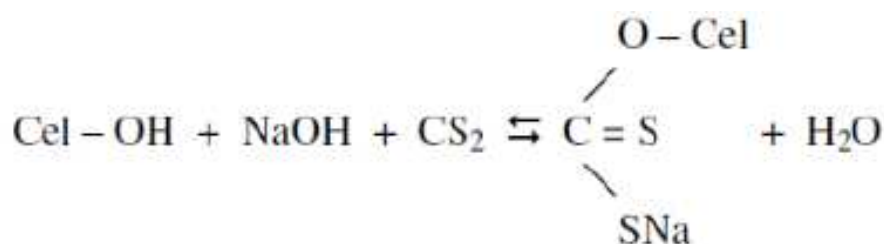
Viskóza patří také do skupiny chemických vláken a vyrábí se z přírodního polymeru (z celulózy). Výroba se skládá z těchto kroků:

- zrání celulózy,
- stárnutí alkaliceleulózy,
- xantogenace,
- rozpouštění,
- zvlákňování a dloužení. [6,7]

Vstupní surovinou pro zrání je nadrcená dřevní hmota, na kterou se nechá působit 17 % roztok hydroxidu sodného při 20 °C po dobu 60 minut. Díky tomu vzniká alkalixelulóza. [6,8]

Při stárnutí dochází k částečné oxidaci vzdušným kyslíkem a původně dlouhý řetězec s průměrným polymeračním stupněm 2 000 je zkrácen přibližně na PPS 400. Proces probíhá cca 3 hodiny. [6,8]

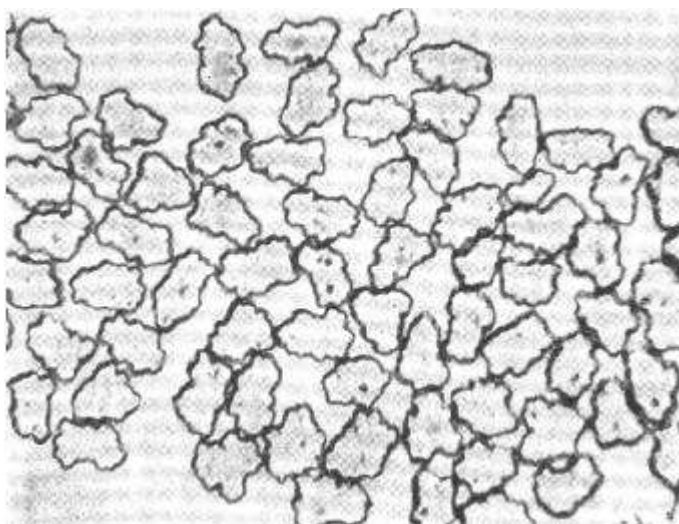
Dále působením sulfidu uhličitého vzniká „xantogenát“ (dočasná esterifikace). Tím byla vytvořena žlutooranžová tříšť. Proces ukazuje **obrázek č. 3**. [6,8]



Obrázek č. 3 – Formální zápis xantogenace [7]

Následuje proces rozpouštění xantogenátu v cca 5 % roztoku NaOH, kdy vzniká viskózní roztok medovitého charakteru (odtud název viskóza). Součástí kroku je i filtrace, která zvyšuje kvalitu produktu. [6,8]

Posledními kroky jsou zvláknování a dloužení. Připravený produkt je zvláknován do kyselého prostředí kyseliny sírové. Při teplotě 50 °C začne probíhat koagulace (zjednodušeně srážení) xantogenátu a zahájí se rozklad na celulózu a CS₂. Tento produkt je protlačován tryskou a vznikají vlákna. Avšak kvůli CS₂ ve vláknech vznikají plyny, které se začnou rozptylovat do prostoru za vzniku místního přetlaku a podtlaku. Následkem toho je původní kruhový průřez vlákna zborcen do laločnatého průřezu (**viz obrázek č. 4**). Nakonec jsou vlákna dloužena, kdy dojde k orientaci makromolekulárních řetězců, a tedy zvýšení pevnosti vlákna. [6-9]



Obrázek č. 4 – Příčný řez viskózovými vlákny [7]

Viskózová vlákna jsou laciná, nicméně jejich výroba je ekologicky nepříznivá vzhledem k použitým chemikáliím. Materiál je dále hydrofilní a ve vodě radikálně zvětšuje svůj objem. Vlákna mají malou odolnost vůči mikroorganismům a jejich pevnost se za mokrého stavu může snížit dokonce až na polovinu. Dále velmi snadno hoří, mají malou odolnost vůči alkáliím a mají sklony k mačkavosti. [7,9]

Využití nachází zejména v oděvech, zdravotních materiálech a dekoračních textiliích. Vysokopevnostní varianty viskózových vláken nacházejí uplatnění například na kordy pneumatik. [1,9]

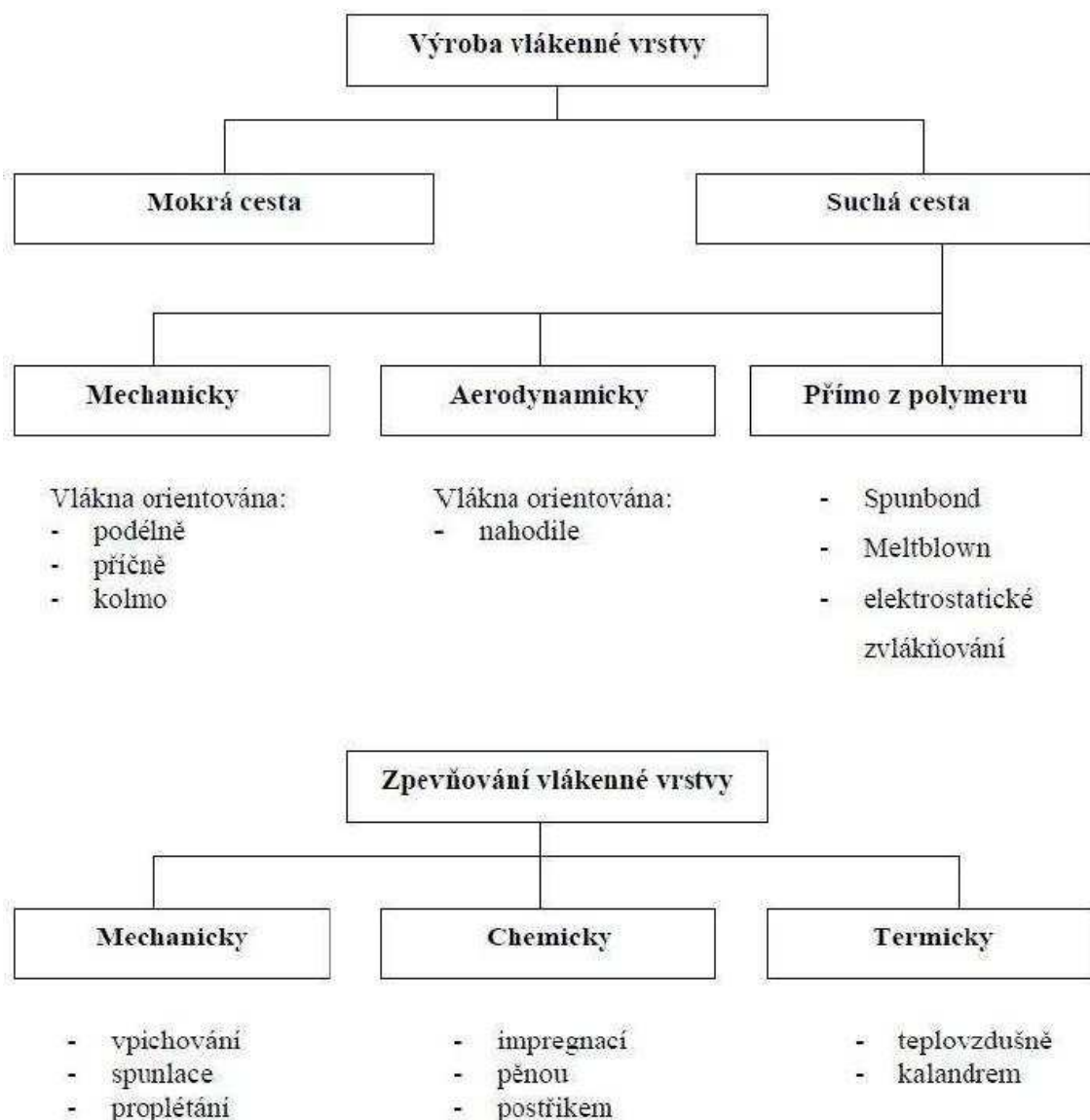
Vlastnosti v číslech vypadají takto:

- hustota 1 520 kg/m³,
- tažnost za sucha 15-30 %,
- pevnost v tahu za sucha 2,2 cN/dtex,
- tažnost za mokra 100-120 %
- pevnost v tahu za mokra 1,2 cN/dtex,
- LOI 19 %,
- navlhavost 11-13 % [8]

2.3 Technologie netkaných textilií

Netkané textilie mají speciální textilní strukturu v tom smyslu, že oproti tkaninám, či pleteninám není základním prvkem příze, ale vlákna samotná. Dále se liší mechanickými,

izolačními vlastnostmi a způsoby použití. NT jsou využívány jako geo/agrotextilie, v automobilovém průmyslu, zdravotnictví, letectví a kosmonautice, ocelářském průmyslu a mnoha dalších. Možné výroby takových textilií zobrazuje **obrázek č. 5**. Velká výhoda oproti technologiím tkaní a pletení tkví v levné a rychlé výrobě v obrovských objemech. Díky tomu se podařilo tomuto oboru vytlačit ostatní textilní technologie z několika odvětví na trhu a obor netkaných textilií je stále nejrychleji rostoucím textilním odvětvím. [1,6,10]

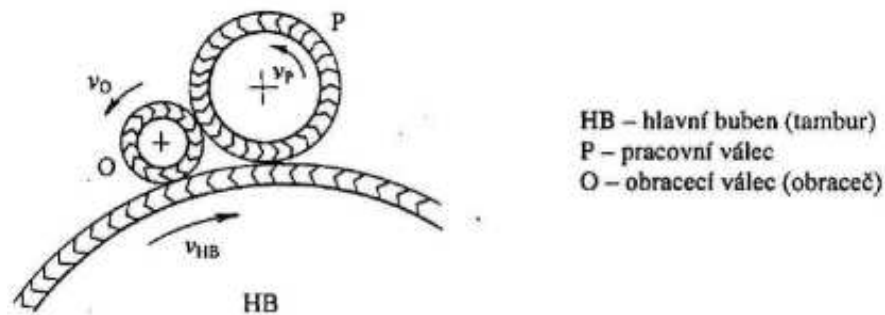


Obrázek č. 5 – Diagram znázorňující možné způsoby výroby a zpevnění NT [10]

Pro pochopení experimentální části této diplomové práce (**viz 3 Praktická část**) je zcela dostačující zabývat se pouze suchou cestou výroby, a to jen mechanickou částí. Rovněž postačí vysvětlit zpevnění vláknenné vrstvy mechanickým způsobem. Jmenovitě se jedná o procesy: mykání, příčné kladení a vpichování.

2.3.1 Proces mykání

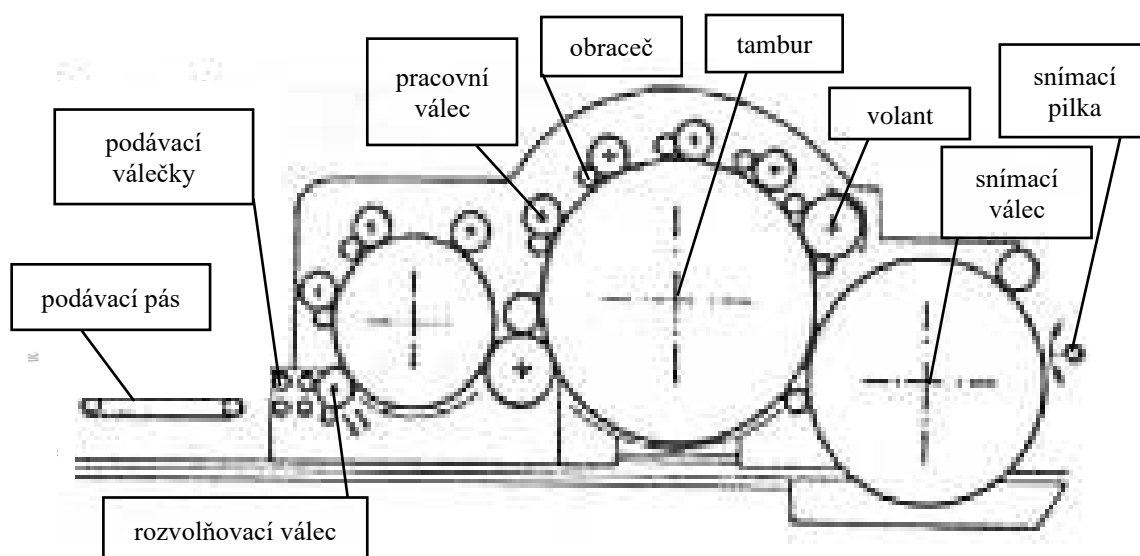
Mykání je mechanickou odnoží suché cesty výroby vlákenné vrstvy. Někdy je tento proces označován jako rozvlákňování a je realizován pomocí mykacích strojů, ať už víčkových, či válcových. Pro výrobu NT je využíváno zejména válcových mykacích strojů, díky jejich vyšší produkci, než tomu je u MS víčkových. [1]



Obrázek č. 6 – Pracovní ústrojí válcového MS [1]

Hlavní částí stroje je prostor mezi tamburem, pracovním válcem a obracečem. Všechny znázorněné válce jsou opatřeny potahy ve formě pilek, drátků, či jiných hrotů. Mezi válci prochází vlákna, která jsou působením pracovních potahů postupně napřimována, čištěna a ojednocována. Ojednocení je termín označující oddělení vláken z podoby vloček a jiných neuspořádaných struktur do podoby podélně uspořádaných vláken vzájemně držících pomocí třecích sil. Díky tomu je na MS vytvořena silně anizotropní struktura, která je nazývána „pavučina“. Pavučina je tedy cíl výroby na MS a v případě využití do NT je pavučina dále kladena (viz 2.3.2 Příčné kladení). [1]

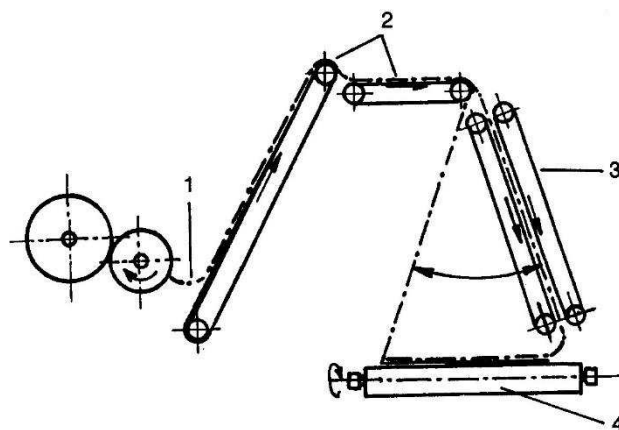
Pracovní ústrojí uvedené na **obrázku č. 6**, není jediné, které se v MS nachází. Schéma celého ústrojí zobrazuje **obrázek č. 7**.



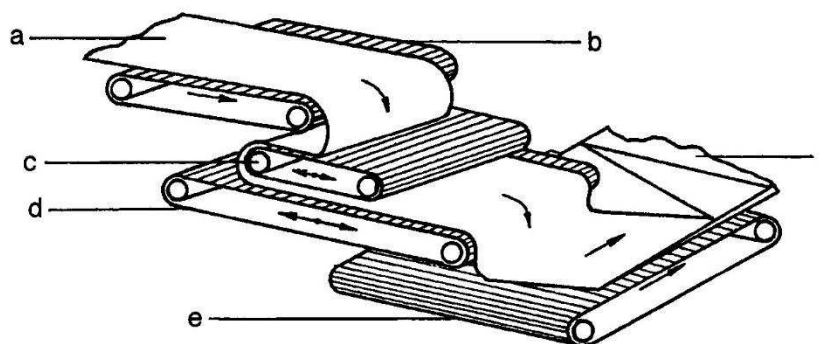
Obrázek č. 7 – Schéma válcového MS [10]

2.3.2 Příčné kladení

Příčné kladení je hojně užívaný způsob utváření rouna z pavučiny, která vychází z MS. Pavučina je vratným pohybem ramene (či horizontálních stolů) vrstvena na spodní dopravník, který vznikající rouno odvádí pryč v úhlu 90°. Základní principy příčných kladečů jsou dva, a to vertikální a horizontální (viz obrázky č. 8 a č. 9). [10,11]



Obrázek č. 8 – Vertikální příčný kladeč (1. pavučina z MS, 2. příváděcí dopravníky, 3. dvojice kladečích výkyvných pásů, 4. odváděcí dopravník) [11].



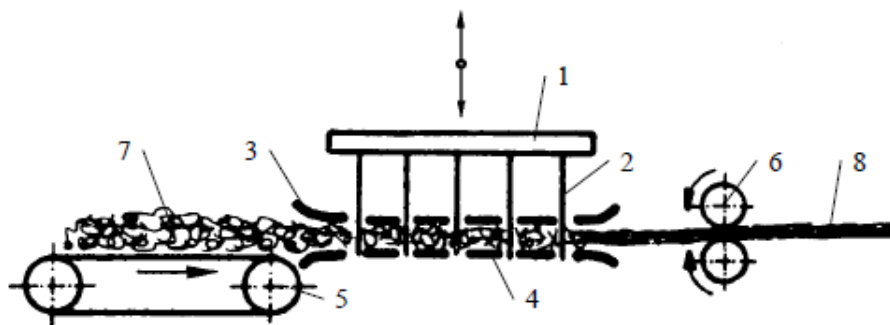
Obrázek č. 9 – Horizontální příčný kladeč (a. pavučina z MS, b. přiváděcí dopravník, c. kompenzační dopravník, d. kladecí dopravník, e. odváděcí dopravník, f. příčně vrstvené rouno) [11].

Typickým znakem, takto kladených roun jsou šikmé sklady, jejichž úhel je ovlivněn zejména rychlostí kladecího a odváděcího dopravníku. V praxi je zvykem, že dopravníky střídavě zrychlují a zpomalují, aby se docílilo homogenity vlákenného materiálu v celé šíři (jinak je v krajích NT jiná hustota vláken než uprostřed). Plošná hmotnost je ovlivňována: šířkou stroje, rychlostí dodávky vlákenné hmoty a rychlostí odváděcího dopravníku. Je patrné, že takto vzniklé rouno je nezpevněné, a tudíž velmi náchylné k mechanickému poškození. Proto musí být rouno dále zpevněno. [10,11]

Dále existují i další způsoby kladení pavučin, jako například podélné, či kolmé kladení, ale ty nejsou důležité pro potřeby této diplomové práce.

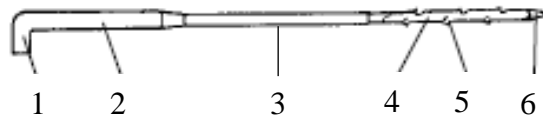
2.3.3 Technologie vpichování

Technologie vpichování patří k nejdéle používaným způsobům mechanického zpevnování vlákenné vrstvy. Principem je vzájemné provazování vláken ve vlákenné struktuře pomocí jehel s ostny. [12]



Obrázek č. 10 – Schéma útrob vpichovacího stroje (1. jehelná deska, 2. jehla, 3. stírací rošt, 4. opěrný rošt, 5. přiváděcí pás, 6. odváděcí válce, 7. rouno, 8. vpichovaná NT) [1]

Nezpevněné rouno je přivedeno mezi stírací a opěrný rošt, skrze které pravidelně pronikají jehly umístěné v jehelné desce. Jehelná deska vykonává vratný vertikální pohyb, zatímco vlákněná vrstva pomalu postupuje vpichovacím prostorem. Jednotlivá vlákna, nebo jejich svazky jsou zachytávány v ostnech vpichovací jehly a tím jsou přeorientovány více do kolmého směru. Na výstupu ze stroje je odváděna zpevněná vlákněná vrstva, která působením vpichovacích jehel změnila své rozměry. [12]



Obrázek č. 11 – Vpichovací jehla (1. kolénko, 2. stvol, 3. redukovaná část, 4. pracovní část, 5. ostěn, 6. hrot) [1]

Pro vpichované textilie je definována speciální charakteristika, a to počet vpichů na jednotku plochy. Tento parametr ovlivňuje počet jehel v jehelné desce, frekvence jehelné desky, rychlost odvádění NT a počet průchodů strojem. [12]

$$V_p = \frac{a \cdot f \cdot p}{v}, \quad (2)$$

„ V_p “ je počet vpichů na jednotku plochy [m^{-2}], „ f “ je frekvence vertikálního pohybu jehelné desky [s^{-1}], „ a “ je počet jehel na 1 m vpichovací desky ve všech řadách [m^{-1}], „ p “ je počet průchodů NT strojem, „ v “ je rychlost odváděcích válců [$m \cdot s^{-1}$]. [12]

Dalším parametrem stroje je hloubka vpichu, která sice neovlivňuje počet vpichů, ale ovlivňuje stupeň zpevnění a změnu rozměrů. Hloubka vpichu je definována jako vzdálenost hrotů jehel od opěrného roštu ve chvíli, kdy se jehelná deska nachází v dolní úvrati a vyjadřuje se v mm. [12]

2.4 Proces hoření

2.4.1 Teplota

Teplota je jednou ze základních fyzikálních vlastností látek ve vesmíru a patří tedy do soustavy SI jednotek (jednotka kelvin). Obecně je známo, že základními částicemi jsou atomy. Ať už se jedná o pevné látky, kapaliny, nebo plyny, tak atomy nesetrvávají v klidu a podle síly soudržnosti jednotlivých atomů se hmota nachází v jednom ze skupenství. Při změně pohybu (kmitání) atomů dochází ke změně vlastností dané hmoty. Neboli při

dodání nebo při spotřebování energie se mění kmity atomů a ty se začnou od sebe více vzdalovat, nebo se začnou k sobě přibližovat. Teplota (nebo také tepelná energie) je tedy dána zmíněnými kmity. [13]

Nejčastěji se pro vyjádření teploty využívají ve světě 3 stupnice:

- stupně Kelvina [K],
- stupně Celsia [°C],
- stupně Fahrenheita [°F].

Kelvinova stupnice tedy patří do skupiny fyzikálních SI jednotek a je definován dvěma hodnotami. První je 0 K, což označuje absolutní nulu a druhá je 273,16 K, což je teplota tzv. trojného bodu vody. Trojný bod je stav, kdy jsou v daném systému v rovnováze všechny tři fáze jednosložkové látky a je určen teplotou při určitém tlaku. [13] Od roku 2019 byla přijata i nově interpretovaná definice kelvinu, a to převodem teploty na energii pomocí Boltzmanovy konstanty. [14]

Stupně Celsia byly definovány podle bodu tání a bodu varu vody, při tlaku vzduchu 1 013,25 hPa. Bod tání ledu je samozřejmě stanoven na 0 °C a bod varu vody na 100 °C. Výše zmiňovaný trojný bod vody je zde 0,01 °C. Jelikož platí že 1 °C = 1 K, tak je přepočít na kelviny realizován posunem po stupnici o 273,15. [13]

Stupně Fahrenheita jsou dnes využívány zejména ve Spojených státech amerických. Tato jednotka nejprve využívala nejnižší teploty, jaké se podařilo dosáhnout (0 °F smísením chloridu amonného, vody a ledu) a běžnou tělesnou teplotu (98 °F). Nicméně poté byly tyto referenční body přepracovány do dnešní podoby, což je bod mrazu vody (32 °F) a bod varu vody (212 °F). Vzhledem k tomu, že tyto body jsou od sebe vzdáleny o 180 stupňů, tak platí, že: 1 °F = 5/9 °C (nebo K). [13]

2.4.2 Odpařování látek

Důležité je také odpařování látek při zahřívání materiálu, jelikož každá látka se za určitých podmínek dokáže vypařovat a kmitání atomů s tím má úzkou souvislost. Ve chvíli, kdy dodáme do materiálu takovou energii, která překoná přitažlivé síly atomů, tak atomy začnou odlétat do volného prostoru a dochází tedy k odpařování. [15]

2.4.3 Teplota vzplanutí

Teplota vzplanutí je definována jako teplota, při které je z hořlavé látky odpařováno dostatek par (v dostatečné koncentraci), že po přiblížení plamene krátce vzplanou, ale opět uhasnou. Uhasnutí plamene nastává z důvodu, že po krátkém zažehnutí nedojde k vytvoření dostatečné koncentrace odpařovaných par, aby mohl proces hoření pokračovat samovolně. Tato teplota je rozdělována dle nebezpečnosti (**viz tabulka č. 1**). [16,17]

Tabulka č. 1 – Třídy nebezpečnosti dle teplot vzplanutí [16]

| Třída nebezpečnosti | Teplota vzplanutí [°C] |
|----------------------------|-------------------------------|
| I | do 20 |
| II | 21–55 |
| III | 55–100 |
| IV | nad 100 |

2.4.4 Teplota hoření

Teplota hoření je teplota, při které je hořlavá látka zahřáta na tolik, že uvolňuje dostatek par, které se smísí s kyslíkem a po přiblížení plamene dojde k zažehnutí. Teplota je zároveň dostatečně velká na to, aby i po oddálení plamene látka dále hořela. Rychlost vypařování rozkladných par z materiálu je minimálně stejně velká jako rychlost samotného hoření. Tím je zajištěno dostatek hořlavé směsi pro proces hoření. Tato teplota je vždy vyšší než teplota vzplanutí. [16,17]

2.4.5 Teplota vznícení

Teplota vznícení je stav, kdy hořlavá látka uvolňuje dostatečné množství odpařovaných látek a tyto látky bez přímého zažehnutí plamenem samy vzplanou. Toto je důležité zejména u textilií, které jsou v přímém kontaktu například s topným tělesem, nebo v jiných aplikacích, kde se dosahuje vysokých teplot. Teploty vznícení jsou rozdělovány do tříd (**viz tabulka č. 2**). [16,17]

Tabulka č. 2 – Třídy teplot vznícení dle ČSN 33 0371 [16]

| Teplotní třída | Teplota vznícení [°C] |
|----------------|-----------------------|
| T1 | +450 |
| T2 | 300–450 |
| T3 | 200–300 |
| T4 | 135–200 |
| T5 | 100–135 |
| T6 | 85–100 |

2.4.6 Samovznícení

Samovznícení je proces, při kterém se hořlavá látka sama zahřívá do bodu kdy vzplane. Základní podmínkou pro tento typ vznícení je, že množství vznikajícího tepla musí být větší než teplo, které je odváděné do prostoru. K tomu může dojít v důsledku několika procesů:

- fyzikální,
- chemické,
- biologické. [16]

Fyzikální samovznícení nastává ve chvíli, kdy hořlavá látka je schopna pohlcovat plyny a zároveň vzniká teplo. Tomuto jevu napomáhá skladování těchto látek ve velkém množství na hromadách, kdy je zamezeno dostatečnému odvádění tepla do okolního prostředí. U některých látek je možné způsobit fyzikální samovznícení například úderem (třaskaviny). Za ohnisko je považováno místo, kde se teplota za posledních 24 hodin zvýšila o 3 °C a více. [16,17]

Chemické samovznícení je zapříčiněno kontaktem dvou, či více látek a při tomto styku dochází k exotermní reakci. Tyto děje jsou nejčastěji vyvolané oxidací vzdušným kyslíkem, nebo působením vody. [16,17]

Posledním typem je biologické samovznícení, které způsobují zpravidla rostlinné materiály. Díky nestejnóměrnosti těchto materiálů (dáno podmínkami růstu) dochází ve slabších částech materiálu činností mikroorganismů snadněji k rozpadu rostlinných látek. To vede ke zvyšování teploty a cca při teplotě 70 °C začnou mikroorganismy umírat. Nicméně teplota je již dostatečná k tvorbě uhlíku z jednodušších rostlinných látek. Uhlík

dále oxiduje a zvyšuje teplotu hořlavé látky, čímž vzniká další uhlík a teplota se dostane do bodu, kdy se z materiálu začnou uvolňovat i další látky. Tento proces pokračuje do bodu biologického samovznícení rostlinné hmoty. [16,17]

2.4.7 LOI (LKČ)

Limiting Oxygen Index, v češtině označováno jako limitní kyslíkové číslo, je veličina udávající minimální koncentraci kyslíku v určené směsi s dusíkem, při které dochází k hoření textilie (**viz 2.4.8 Hoření**). Toto číslo je využíváno zejména pro určení hořlavosti textilií. Čím je číslo LOI větší, tím je materiál odolnější proti hoření. Hodnota je experimentálně stanovována pomocí skleněné trubice, skrz kterou prochází definovaná směs (kyslíku a dusíku) a dále je uvnitř umístěn vzorek, který je z vrchu zapálen. [18]

Výpočet procentuální koncentrace se provádí dle následujícího vzorce:

$$LOI = \frac{O_2}{O_2+N_2} * 100 [-], \quad (3)$$

kde O_2 = objem kyslíku [m^3] a N_2 = objem dusíku [m^3]. [18]

2.4.8 Hoření

Hoření je fyzikálně chemická exotermní oxidační reakce, kdy vzniká světlo a teplo. Podmínkou pro vznik tohoto procesu je zapotřebí současné působení několika okolností (**viz obrázek č. 12**). Těmto podmínkám se někdy přezdívá „trojúhelník hoření“. [17]



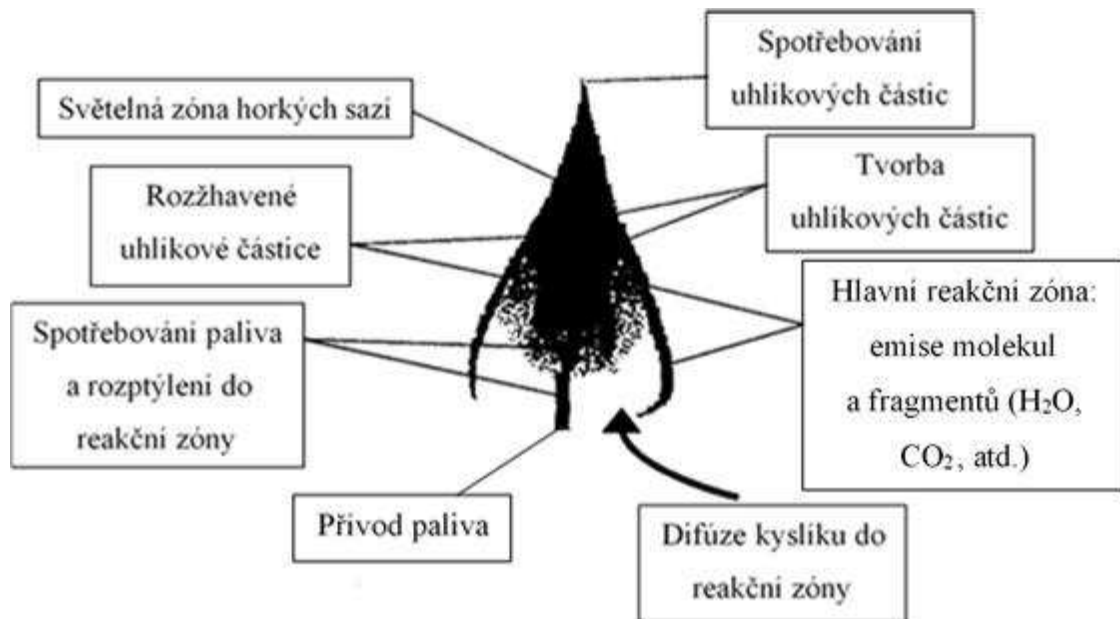
Obrázek č. 12 – Trojúhelník hoření

Někdy je uváděna i čtvrtá podmínka, a to dosažení teploty hoření (**viz 2.4.4 Teplota hoření**). Při hoření jsou také uvolňovány zplodiny, což je další z negativních složek požáru. Za zplodiny jsou považovány veškeré „odpady“ vzniklé při procesu hoření (pevné, kapalně i plynné) a ve většině případů působí dále negativně na živé organismy. Běžnými zplodinami jsou:

- oxid uhličitý,
- oxid uhelnatý,
- oxid dusičitý,
- oxid dusnatý,
- oxid siřičitý,
- chlorovodík,
- kyanovodík,
- a další. [15,17]

Dokonalé hoření je typ hoření, kdy fyzikálně chemická oxidační reakce dosáhla dokonalého spotřebování většiny zplodin pouze pro vlastní hoření. A tedy dále nevznikají zplodiny, který by byly schopné následného hoření. Obvykle jsou uvolňovány jen oxid uhličitý a vodní pára. [15,17]

Naopak nedokonalé hoření produkuje množství zplodin, které jsou dále schopny dalšího hoření. Nebezpečí nastává zejména v případech požáru v uzavřeném prostoru, kdy hořlavé zplodiny mohou nabýt takové koncentrace, že může dojít i k explozi. Při tomto druhu hoření dochází často k uvolňování CO, což je jedovatá látka, která ve směsích se vzdušným kyslíkem může za určitých podmínek právě i explodovat. Dále jsou časté zplodiny HCl, HCN a další karcinogenní a mutagenní látky, a to především při hoření plastů. [15,17]



Obrázek č. 13 – Hlavní procesy probíhající v oblasti plamene [17]

2.4.9 Zkoušení hořlavosti textilií

Každá země má svůj vlastní soubor metod pro testování textilu. Objektívni zhodnocení hořlavosti textilií stěžuje komplikovanost těchto materiálů. Jsou tenké, mají velký povrch a jsou dobře prostoupené vzdušným kyslíkem. Nejběžnější zkoušky hořlavosti textilu jsou v současné době založeny na chování při vznícení (ukazatelem je např. LOI) a rychlosti hoření. Avšak LOI v praxi není pro zkoušení dostatečný ukazatel hořlavosti, jelikož pro stejný materiál v různých textilních strukturách (NT, tkanina, pletenina, ad.), či v různých směsích naměříme rozdílné LOI. I rychlost hoření je těmito proměnnými ovlivněna, protože strukturální atributy textilií mají výrazný vliv na hoření. [17,19]

Pro účely této diplomové, byly vybrány dvě normy pro testování hořlavosti (viz 2.4.9.1 ISO 3795 a 2.4.9.2 VW 01000 (PV 3357)), které mají stejný princip zápalu, ale rozdílnou polohu vzorku.

2.4.9.1 ISO 3795

Tato norma se používá pro stanovení hořlavosti textilních materiálů v interiéru automobilu. Pro vykonání zkoušky je za potřeby spalovací komora M233F od obchodní korporace SDL Atlas. [19]



Obrázek č. 14 – Spalovací komora M233F pro horizontální hoření [20]

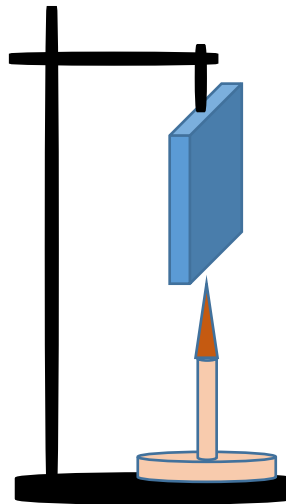
Komora se skládá z odnímatelného vrchního krytu, skleněného okna k pozorování průběhu zkoušky, držáku vzorku ve tvaru „U“ a magnetických dvířek s kahanem. Celkově je konstrukce vyrobena z nerezové oceli. [20]

Testovaný vzorek **20x10 cm** je umístěn do držáku na vzorek, kde je zatížen vrchní částí tohoto držáku. Mezi rameny držáku jsou po **25 mm** rozmístěny drátky o průměru **0,25 mm**, které mají usnadnit určení rychlosti hoření. Průměr kahanu je **9 mm** a plamen by měl dosahovat výšky **3–4 cm**. Po uzavření dvířek zasahuje plamen do krajní části zkoušeného vzorku, a to do středu jeho kratšího okraje (okraj kahanu je **19 mm** pod vzorkem). Plamen působí na vzorek **15 vteřin** a poté jsou dvířka opět otevřena. Dále se sleduje samovolné šíření plamene ve vzorku. Konec testování nastává v okamžiku shoření celého vzorku, či při spontánním uhasnutí plamene. [21]

Dále jsou v normě definovány i rozměry digestoře, kde je tato spalovací komora usazena. Digestoř musí svou velikostí odpovídat dvaceti až sto násobku velikosti horizontální spalovací komory. Vzhledem k tomu, že při spalování vzorku se mohou uvolňovat nebezpečné látky, tak hodnota rychlosti vzduchu ve vertikálním směru musí být mezi **0,1–0,3 m/s**. [21]

2.4.9.2 VW 01000 (PV 3357)

Pro vykonání vertikální spalovací zkoušky je za potřebí stojan **viz obrázek č. 15**. Stojan je tvořen z pevné ocelové základny, ze které se tyčí konstrukce složená z pohyblivých ocelových prutů. Ve vrchní části je umístěna svěrka, do které se uchycuje testovaný vzorek. Pod vzorek je přikládán kahan.



Obrázek č. 15 – Schéma postavení vzorku a kahanu pro vykonání vertikální zkoušky

Norma definuje velikost používaných vzorků na **20x23 cm**, které jsou zapalovány od středu spodního okraje. Plamen musí dosahovat výšky **3–4 cm**, přičemž musí do zkoušeného vzorku zasahovat minimálně **1 cm**. Délku působení plamene lze zvolit **15 s**, nebo **10 min**, poté je kahan odstraněn a opět se sleduje šíření plamene. Konec testování nastává ve chvíli shoření vzorku, nebo při samovolném uhasnutí plamene. [22]

3 Praktická část

Jak bylo zřetelně popsáno v teoretické části, následující část se bude jmenovitě zabývat přípravou, výrobou a testováním vzorků na hořlavost dle norem. Navíc bude popsána provedená termogravimetrická analýza, jenž byla použita na testované materiály. Dále byla použita i obrazová analýza, za použití tzv. Cavalieriho principu ve snaze lépe zmapovat strukturu vláken ve vpichované textilií.

3.1 Příprava vzorků

Přípravu vzorků zahrnovalo seznámení se s vybranými materiály (**viz 2.2 Použité materiály**) a s testovacími normami (**viz 2.4.9 Zkoušení hořlavosti textilií**), které měly být na tyto vzorky aplikovány. Jmenovitě bylo použito pro testování vlákno PANOX s označením C63-1,7/1,39-A140, jehož parametry jsou k vidění v **tabulce č. 3**. Dále bylo použito VS vlákno s parametry, které ukazuje **tabulka č. 4**.

Tabulka č. 3 – Vlastnosti použitých vláken PANOX

| Vlastnost | Hodnota |
|------------------|-------------------------|
| Jemnost | 1,7 dtex |
| Délka vlákna | 63 mm |
| Hustota | 1 390 kg/m ³ |
| Tažnost | 22 % |
| Pevnost | 1,5 – 2 cN/dtex |
| Navlhavost | 5 % |
| Obloučkovitost | 6 obloučků na 1 cm |
| Povrchová úprava | Antistatická |

Tabulka č. 4 – Vlastnosti použitých VS vláken

| Vlastnost | Hodnota |
|--------------|-------------------------|
| Jemnost | 3,3 dtex |
| Délka vlákna | 55 mm |
| Hustota | 1 520 kg/m ³ |
| Tažnost | 20 % |
| Pevnost | 1,6 – 2,5 cN/dtex |
| Navlhavost | 10 % |

Navážky vláken do válcového mykacího stroje činily vždy **140 g**. Navážky byly vždy rozškálovány do **5 skupin** dle **tabulky č. 5**. Cílem bylo dále vyrobit z těchto navážek vpichované NT s danými objemovými hmotnostmi. Bylo určeno, že zkoušené objemové hmotnosti budou nabývat hodnot **10, 20 a 30 kg/m³**, což jsou snadno vyrobitelné výstupní hodnoty zkoušených vpichovaných NT v rámci poloprovozu katedry netkaných textilií a nanovláknenných materiálů působící na Technické univerzitě v Liberci.

Tabulka č. 5 – Značení vzorků

| Navážka 140 g vláken | Označení |
|-----------------------------|-----------------|
| 100 % Viskóza | 100V |
| 75 % Viskóza a 25 % PANOX | 75V 25P |
| 50 % Viskóza a 50 % PANOX | 50V 50P |
| 25 % Viskóza a 75 % PANOX | 25V 75P |
| 100 % PANOX | 100P |

Do mykacího stroje byla přiváděna vlákna ve výše popsáných poměrech vždy po předchozím vyčištění mykacích povlaků (tzv. „vymykáním“). Přestože byla vlákna PANOX opatřena antistatickou úpravou, tak ve směsi s VS vlákny se v pavučině shromažďoval elektrický náboj, což znesnadňovalo přípravu vláknenné vrstvy. Problém byl ihned vyřešen zvýšením vzdušné vlhkosti v okolí MS. Poté tedy MS vyrobil pavučinu, která byla okamžitě odváděna do vertikálního příčného kladeče. Příčný kladeč měl v okamžiku kladení vypnutý odváděcí dopravník a pavučina byla tedy vrstvena na sebe do výšky. Tím bylo vyrobeno objemné a nezpevněné rouno o rozměrech **cca 50x100 cm**. Při mykání VS a PANOX vláken ve směsích nedošlo na poprvé k řádnému promísení, a proto byla tato rouna mykána a kladena dvakrát, než bylo možné pokračovat k dalšímu kroku výroby. Řádně promísená vyrobená rouna byla podložena jinou vpichovanou NT, aby byl umožněn průchod vpichovacím strojem. Jelikož ve zmíněném poloprovozu neprobíhá konstantní výroba, tak muselo být každé vyráběné rouno znovu a znovu naváděno do stroje ručně.

U vpichovacího stroje nastal další problém, a to při nastavování hloubky vpichu. Každé rouno s rozdílným směřovacím poměrem se chovalo ve vpichovacím stroji jinak. Proto se hloubky vpichu a počet průchodů strojem určovaly individuálně rouno od rouna, dokud nebylo dosaženo kýžené objemové hmotnosti. To bohužel zapříčinilo rozdílné počty vpichů ve vzorcích v rozmezí **od 1 000 000 do 3 000 000 vpichů na m²** (nastavené

hloubky vpichu u vpichovacího stroje při výrobě jednotlivých vzorků ukazuje **tabulka č. 18 (viz 7 Přílohy)**. Ostatní pevně stanovené parametry použitého vpichovacího stroje jsou následující:

- počet jehel: 2 000 [1/m],
- frekvence vpichování: 200 [1/min],
- odváděcí rychlost materiálu: 0,4 [m/min],
- použité jehly: 14x22x54x3.

Z vyrobených NT byly nastříhány vzorky o rozměrech **20x10 cm**. Pro jeden směsovací poměr, jednu objemovou hmotnost a jednu testovací normu byly vyrobeny **4 vzorky**. Celkově tedy pro první testování bylo připraveno **60 vzorků**.

Ověření správné objemové hmotnosti probíhalo na přesných vahách a pomocí tloušťkoměru „Elcometer 456“. Přístroj se nejprve musel kalibrovat pomocí přiložených etalonů. Poté jednoduchým přiložením měřicí hlavy (neferomagnetické sondy) byla změřena tloušťka materiálu.



Obrázek č. 16 – Elcometer 456 s použitou neferomagnetickou sondou [23]

Přístroj dovede měřit rychlostí více než **70 hodnot za minutu** a je vybaven širokou škálou sond. Maximum měřené tloušťky je však jen **30 mm**, nicméně dokáže měřit s přesností **± 1 %**.

3.2 Testování hořlavosti

Dle normy ISO 3795 byly vyrobené vzorky testovány ve spalovací komoře (viz obrázek č. 14). Vzorky byly vkládány volně pod horní část svorek, tak aby delší kraje přesně kopírovaly svorky a přední část vzorku byla zároveň s krajem. Horní svorka byla distancována na tloušťku vzorku, aby nebyl svorkou stlačen. Poté byla komora z horní části uzavřena krytem a mohlo začít testování. Dvířka obsahující zapálený kahan byla uzavřena a na vzorek začal působit normou definovaný plamen. Po **15 vteřinách** byla dvířka otevřena a sledovalo se samovolné šíření plamene.

Po vyhodnocení naměřených hodnot bylo usouzeno, že tato metoda (můžeme nazývat horizontální metodou) je příliš „mírná“ pro tento typ zkoušeného materiálu, jelikož v případě vzorku s označením **75V 25P** a objemovou hmotností **10 kg/m³** již neproběhl proces samovolného hoření (viz obrázek č. 17). Protože by nebyly s čím porovnávat hmotnostní úbytky, tak u této metody nebyly brány v potaz.



Obrázek č. 17 – Ohořelý 75V 25P (10 kg/m³)

U takto vysokého podílu velmi hořlavých VS vláken se očekávalo, že vzorek shoří celý. Dokonce i u ostatních objemových hmotností neproběhlo hoření v celém objemu vzorku, ale jen středem. To by ani zdaleka neposkytlo dostatek údajů pro porovnání trendů v hoření (zejména v ostatních směsovacích poměrech), a tak bylo přistoupeno k druhé testovací normě (můžeme nazývat vertikální metodou).

Norma VW 01000 (PV 3357) byla uzpůsobena našim již připraveným vzorkům, tedy místo **20x23 cm** byly použity stejné vzorky jako pro předešlou metodu, tedy **20x10 cm**. Zbytek parametrů zkoušky byl dodržen. Do horní svorky stojanu (viz obrázek č. 15), byl

vzorek uchycen za kratší okraj. Vzorek tedy volně visel a k jeho spodnímu konci byl přiložen zapálený kahan. Přímé působení plamene trvalo opět **15 vteřin** a poté byl kahan odstraněn. Následně se měřil čas šíření plamene a hmotnostní úbytek.

Metoda se ukázala být agresivnější, což se projevilo na naměřených časech, a také dokonce i shořením vzorku **50V 50P (30 kg/m³)**.

3.3 Rozvoj testovací řady

Vzhledem k dosaženým výsledkům bylo rozhodnuto o rozšíření testovací řady o další objemové hmotnosti vzorků. Cílem bylo, pokud možno zmapovat trendy pro všechny testovací míšící poměry.

Pro horizontální hoření byly tedy vyrobeny navíc vzorky s **25, 35 a 40 kg/m³**, ale pouze pro **100V, 75V 25P a 50V 50P**. V předešlém testování byl působící plamen neefektivní na míšící poměry **50V 50P, 25V 75P a 100P**, avšak přepokládalo se, že alespoň u řady **50V 50P** by se mohl plamen rozhořet u vyšší objemové hmotnosti, a proto byl nakonec zařazen do dalšího testování. Zvolené objemové hmotnosti již byli dostačující pro zmapování trendu.

Pro vertikální metodu bylo navíc vyrobeno také několik nových vzorků. Pro míšící poměry **100V, 75V 25P a 50V 50P**, byly rovněž vyrobeny vzorky o objemových hmotnostech **25, 35 a 40 kg/m³**. Tím byl zmapován pouze trend pro **50V 50P**. U **100V** nebylo potřeba dále testovat, jelikož viskózní vlákna budou v tomto případě hořet vždy a jen se prodlužuje čas hoření. U míšícího poměru **75V 25P** stále nebyl nalezen sestupný trend, a tak pro tento poměr, byly vyrobeny ještě **45 a 60 kg/m³**. Tím byla završena výroba a testování vzorků na hořlavost.

Tímto rozvojem bylo dosaženo celkového množství vzorků **200 kusů**. Přehledně celý rozvoj testovací řady ukazuje následující tabulka, kde každé zaškrtnutí reprezentuje 4 vyrobené kusy vzorků.

Tabulka č. 6 – Vyrobené vzorky

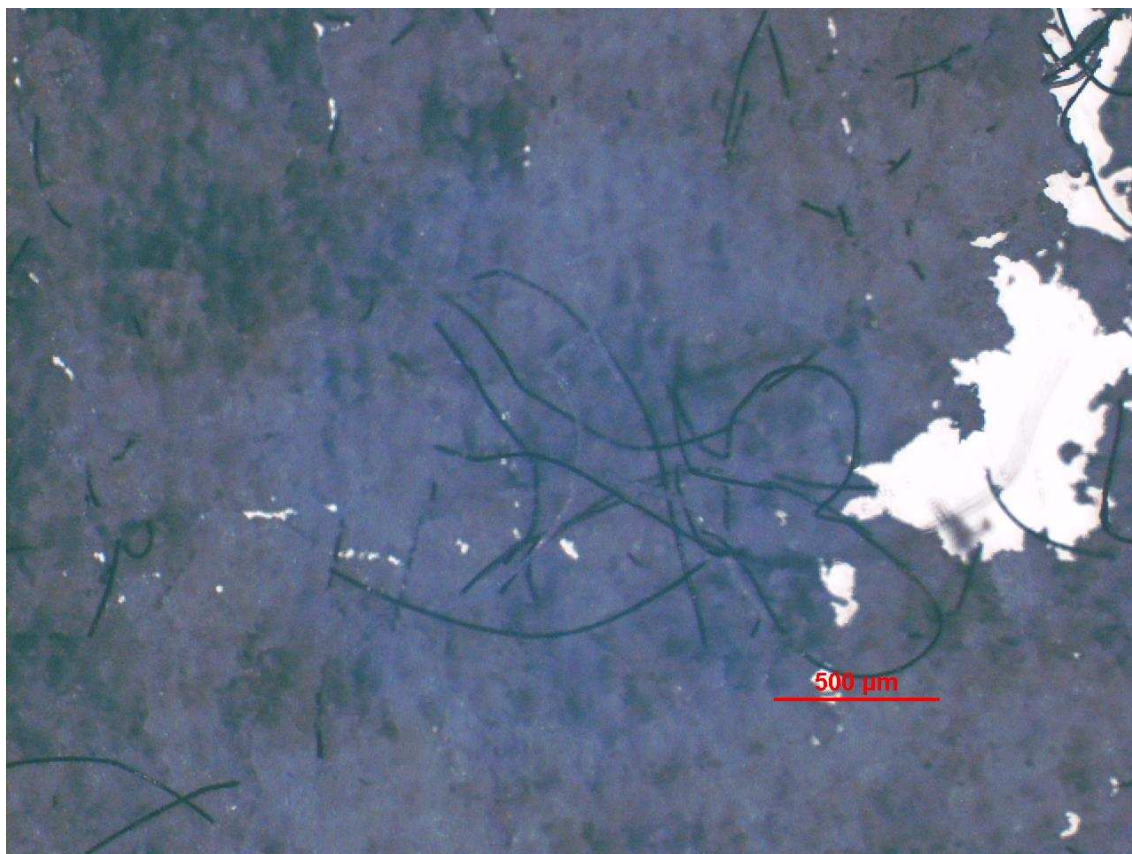
| | | Objemové hmotnosti [kg/m ³] | | | | | | | |
|---------------------|---------|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 60 |
| Horizontální metoda | 100V | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| | 75V 25P | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| | 50V 50P | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| | 25V 75P | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | |
| | 100P | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | |
| Vertikální metoda | 100V | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| | 75V 25P | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | 50V 50P | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| | 25V 75P | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | |
| | 100P | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | |

3.4 Obrazová analýza

Z vyrobených vpichovaných netkaných textilií, byl vybrán vzorek **25V 75P** o objemové hmotnosti **20 kg/m³** k uplatnění obrazové analýzy a Cavalieriho principu. Motivem bylo bližší popsání struktury vláken ve vzorku (např. určení zaplnění, či potvrzení procentuálního zastoupení jednotlivých vláken).

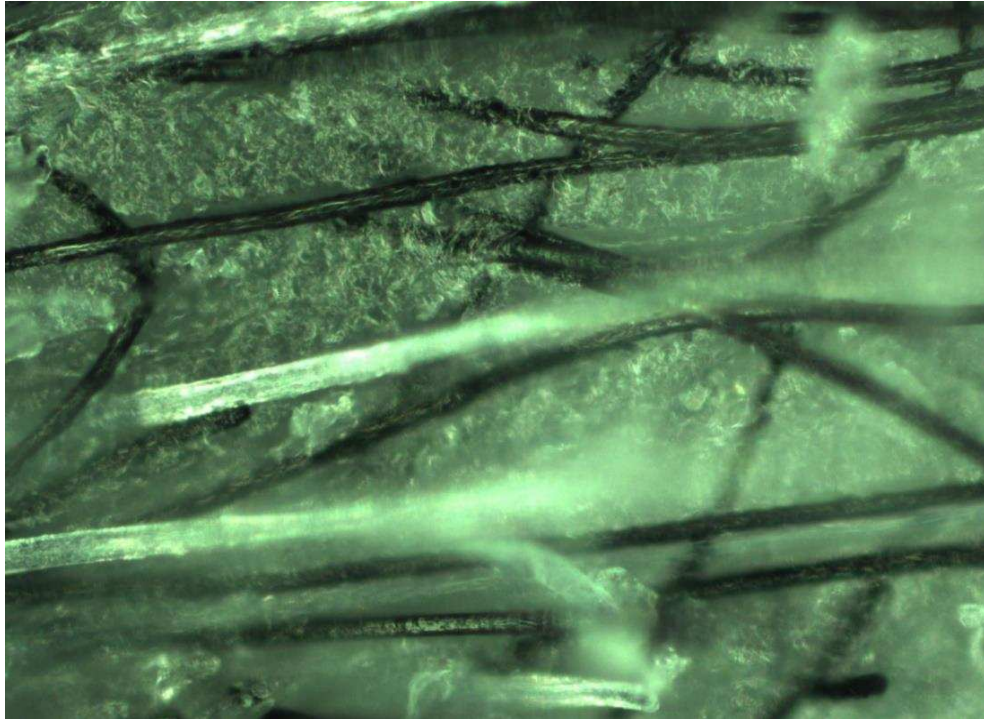
Vzorek byl nejprve zmenšen na velikost cca **3x3 cm**. Tento malý segment vzorku byl vložen do připravené nádoby, kde byl celý zalit roztaveným parafínem (z běžných čajových svíček). V nádobě byl vzorek tedy ponechán při pokojové teplotě, dokud nezuhl parafín. Po ztuhnutí došlo ke zborcení ve středu nádoby, což nenechalo vzorek v „nadýchané“ formě a tím se změnila podoba jeho vnitřní struktury. Vzorek byl tedy vyřazen a pokus byl několikrát opakován, při pokusech o větší prosycení vzorku parafínem pomocí mechanického míchání, nebo jiných podmínkách tuhnutí, a to umístěním nádoby se vzorkem do lednice, či mrazáku. Bohužel pokaždé došlo ke zborcení v oblasti, kde se v nádobě nacházel vzorek. Tím tedy bylo znemožněno popsání objemové struktury vyrobených vzorků, ale takto připravené vzorky mohly být alespoň použity k potvrzení procentuálního zastoupení jednotlivých vláken ve vzorku.

Následovalo použití mikrotomu, kde byl vzorek nařezán a následně pozorován pod optickým mikroskopem. Avšak nasnímané řezy z mikrotomu byly příliš tenké, i když tloušťka řezu činila **80 μm** . Řezy se rozpadaly a kvůli zvrásnění povrchu bylo téměř nemožné pozorovat bílá viskózní vlákna. Příklad snímku z mikrotomu ukazuje **obrázek č. 18**.



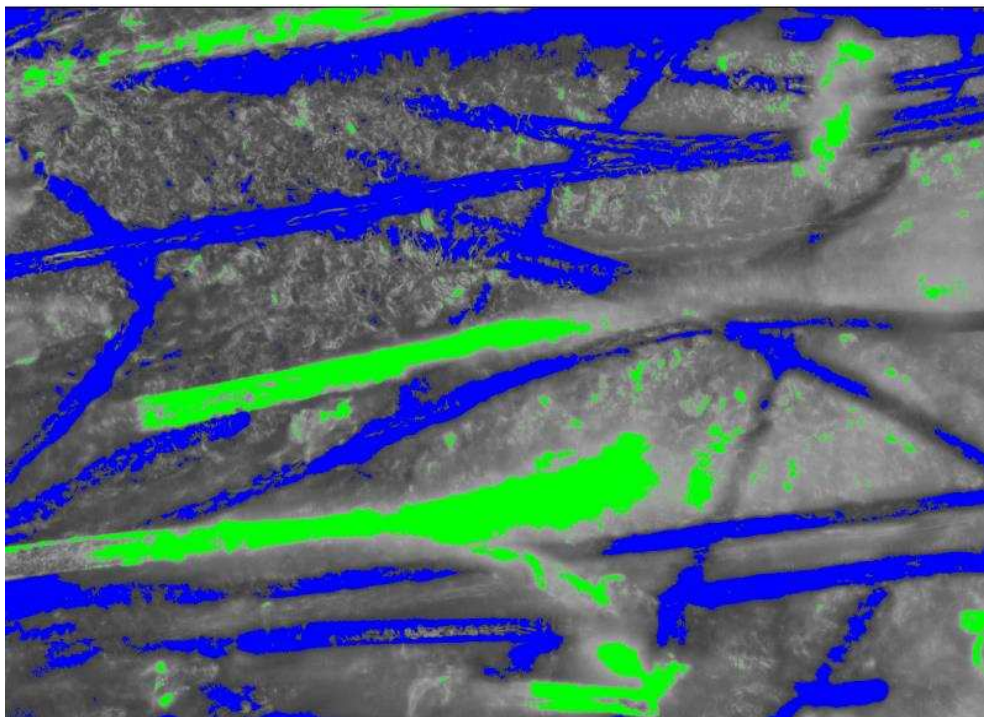
Obrázek č. 18 – Snímek řezu na mikrotomu

Bylo tedy přistoupeno k pokusu nařezat blok vzorku ručně skalpelem. Tloušťka řezu byla cca **3 mm** o přibližně stejně velkých plochách, což zamezilo rozpadání jednotlivých řezů. Navíc byly řezy prováděny v různých směrech. Na takto připravených řezech již byla rozlišitelná VS vlákna, a tedy mohla být provedena obrazová analýza pomocí snímků z optického mikroskopu (ukázka takového snímku **viz obrázek č. 19**).



Obrázek č. 19 – Snímek řezu připraveného ručně skalpelem

Pro vyhodnocení snímků byl použit program Image J za pomoci nástroje Treshold. Obraz také musel být převeden do 8-bitového obrazu, aby funkce Treshold mohla být vůbec aplikována. Ukázkou zpracovaného snímku ukazuje **obrázek č. 20**. V takto zvýrazněných snímcích mohla být vlákna snadno spočtena.



Obrázek č. 20 – Snímek vzorku s aplikovaným Tresholdem

3.5 Termogravimetrická analýza

Součástí praktické části bylo i uplatnění termogravimetrické analýzy (zkr. TGA) na oba použité materiály, tedy VS a PANOX vlákna. Součástí testování materiálů mělo být i použití přístroje pro snímání rozkladných par při testování, což by odhalilo, zda materiály vylučují spíše hořlavé, či nehořlavé plynné zplodiny. Bohužel v době, kdy bylo možné provést TGA, tak tento přístroj pro měření koncentrace a druhu rozkladných plynů nebyl v provozu z důvodu poruchy. Byla tedy použita jen termogravimetrie.

TGA je metoda, kdy je sledována hmotnost vzorků v závislosti na teplotě (příp. čase). Přístroj pro takovouto termickou analýzu se skládá z elektrické pece, přesných vah, nádob na vzorky, zařízení pro regulaci a měření teploty a počítače zpracovávajícího data. Pro analýzu byla použita verze s vertikálním uložením vzorku položeným na mechanismu přesných vah. Použité nádoby na vzorky byly z korundu (oxidu hlinitého).

Testování probíhalo v inertní atmosféře dusíku od **50 °C** (počátek testu) do **600 °C** při zvyšování teploty **10 °C/min** a přívodu dusíku **50 ml/min**. Od **600 °C** do **800 °C** (konec testu) testování probíhalo stále při zvyšování teploty **10 °C/min**, ale změnil se přívod atmosféry z dusíku na kyslík, ale stále rychlostí **50 ml/min**. Vzorek VS vláken před testováním vážil **7,236 mg** a vzorek PANOX vláken **2,325 mg**. Výstupem z měření byl graf s termogravimetrickou křivkou (TG) proloženou zároveň derivační termogravimetrickou křivkou (DTG).

4 Vyhodnocení

V poslední části budou prezentovány výsledky z testování, včetně tabulek a grafů. První budou popsány výsledky z termogravimetrické analýzy. Vysvětleny budou jednotlivé děje při tomto testování a k nim přiřazeny reprezentativní teploty. Dále budou rozebrány jednotlivé typy vzorků a jejich chování při provedených zkouškách hoření.

4.1 TGA

4.1.1 Viskóza

V přílohách této práce je k dispozici graf zobrazující celý průběh zkoušky pro VS vlákna (**viz 7. Přílohy, graf č. 6**). Graf obsahuje **TG (černá)** a **DTG (červená)** křivku. TG křivka je zapisována přímo měřícím přístrojem a DTG křivka byla dopočtena samostatně. Pomocí DTG křivky lze lépe identifikovat počátky a konce jednotlivých dějů.

V **grafu č. 6** je viditelné, že při testování došlo celkem ke třem dějům. První děj započal přibližně při **58 °C** a pokračoval do **130 °C**. Inflexní bod připadá na hodnotu **83,33 °C**, a vždy reprezentuje teplotu s nejrychlejším úbytkem hmotnosti. Po dokončení prvního děje došlo ke snížení hmotnosti o **10,0525 %**, tedy o **0,7274 mg**. Tento děj souvisí s dehydratací zkoušeného materiálu (vypařování vody). Druhý děj započal cca na hodnotě **175 °C** a končil při **460 °C**, kde se odečetla hmotnostní ztráta **73,1343 % (5,292 mg)**. Inflexní bod se nachází v hodnotě **329,33 °C**. Během druhého děje došlo k termickému rozkladu materiálu v inertní atmosféře dusíku. Po dosažení teploty **600 °C** byl vyměněn dodávaný dusík za technický vzduch a v tomto bodě započal třetí děj, který lze z grafu odvodit. Konec děje nastal přibližně při **620 °C** a inflexní bod přísluší hodnotě **606,33 °C**. Konec třetího děje odhalil hmotnostní ztrátu **15,6716 %**, což odpovídá **1,134 mg**. Třetí děj zobrazuje totální spálení materiálu a odhalil obsah nespalitelných zbytků materiálu, což činilo přibližně **0,0826 mg**. Z toho vyplývá, že materiál byl touto termickou analýzou spálen na popel. Obecně lze říci, že **10 %** hmotnosti vzorku tedy činí voda a **90 %** samotný materiál, z něhož je **1 %** nespalitelné.

Tabulka č. 7 – Shrnutí TGA pro VS vlákna

| Děje | Úbytek [%] | Rozmezí [°C] | Inf. bod [°C] | Zbývající hmotnost [mg] |
|-------------|------------|--------------|---------------|-------------------------|
| Dehydratace | 10,0525 | 58–130 | 83,33 | 6,489 |
| Rozklad | 73,1343 | 175–460 | 329,33 | 1,1970 |
| Spálení | 15,6716 | 600–620 | 606,33 | <0,0826 |

4.1.2 PANOX

V přílohách lze opět nalézt graf s TGA pro PANOX vlákna (**viz 7. Přílohy, graf č. 7**). Graf rovněž obsahuje TG a DTG křivku. U tohoto materiálu jsou pozorovatelné opět tři děje, stejně jako u VS vláken. Nicméně na první pohled je jasné, že průběh křivky u PANOX vláken je mnohem plošší, než tomu bylo v předešlém případě. Už jen to předesílá, že se jedná o teplotně odolnější materiál. Zároveň však plochost křivky znesnadňuje přesnější odečítání počátků a konců dějů (subjektivní vyhodnocení).

První děj je opět spjatý s dehydratací materiálu a došlo k ní přibližně mezi hodnotami **60 °C** a **120 °C**. Ztráta hmotnosti na konci děje činila **3,0968 %**, což je **0,083 mg**. Zde se nejvíce projevila nejednoznačnost počátků a konců dějů, jelikož inflexnímu bodu náleží hodnota **65,67 °C**, ale středovou hodnotu program zároveň určil na **81,5 °C**. Druhý děj zase odpovídá teplotnímu rozkladu materiálu a začíná cca na **320 °C** a končí v **420 °C**, při hmotnostním úbytku **30,2796 %**, tedy **0,704 mg**. Inflexní bod děje připadá na hodnotu **378,33 °C**. Poslední děj stejně jako u VS vláken začíná při **600 °C** při výměně atmosféry, ale končí cca u hodnoty **650 °C** a jedná se opět o totální spálení materiálu. Inflexní bod se nachází v hodnotě **610 °C**. Po dokončení spálení došlo ke ztrátě **66,4898 % (1,5459 mg)** hmotnosti materiálu. Materiál byl absolutně spálen s minimálním zbytkem a tedy **3 %** hmotnosti vzorku připadají vodě a **97 %** testovanému materiálu (z toho **0,1 %** nespalitelné zbytky).

Vzhledem k teplotě rozkladu v rozmezí **320–420 °C**, jsou opravdu PANOX vlákna tepelně odolnější než obyčejná polyakrylonitrilová vlákna, která mají teplotu rozkladu cca **250–360 °C**.

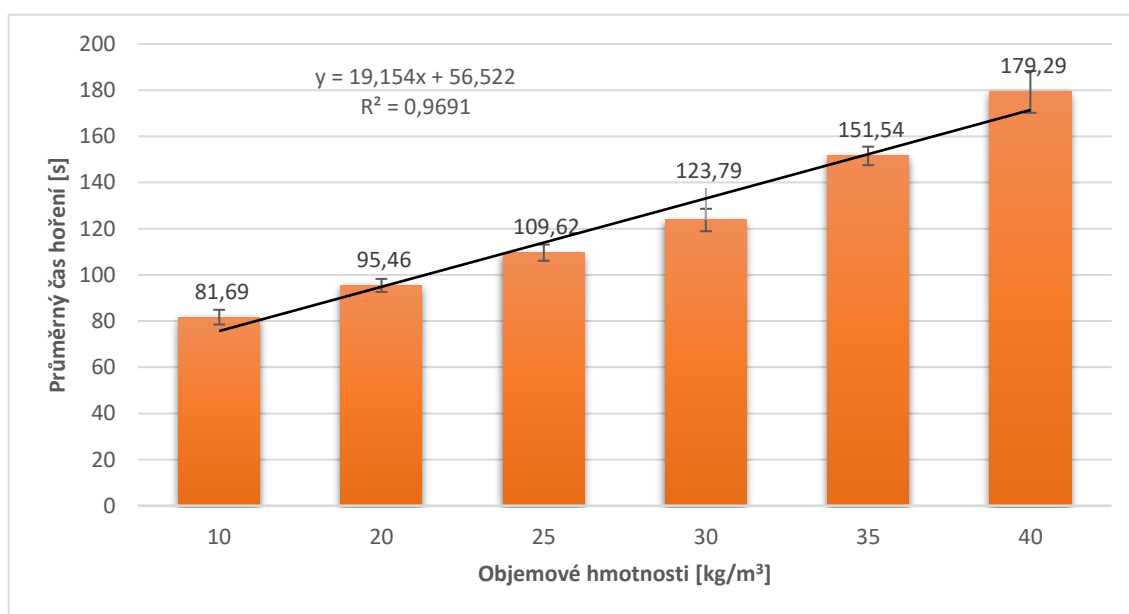
Tabulka č. 8 – Shrnutí TGA pro VS vlákna

| Děje | Úbytek [%] | Rozmezí [°C] | Inf. bod [°C] | Zbývající hmotnost [mg] |
|-------------|------------|--------------|---------------|-------------------------|
| Dehydratace | 3,0968 | 60–120 | 65,67 | 2,242 |
| Rozklad | 30,2796 | 320–420 | 378,33 | 1,538 |
| Spálení | 66,4898 | 600–650 | 610 | <0,003 |

4.2 100V

U vzorků obsahující 100 % viskózních vláken se od začátku očekávalo, že vždy shoří, a to se i potvrdilo. Přesto byly do testovací řady zařazeny, kvůli odhalení vlivu samotné objemové hmotnosti.

1. Horizontální metoda



Graf č. 1 – Výsledky hoření 100V pro ISO 3795

Graf č. 1 zobrazuje průměrné naměřené časy hoření pro jednotlivé objemové hmotnosti. Časy jsou zároveň proloženy přímkou, jejíž rovnice a koeficient determinace (druhá mocnina koeficientu korelace) jsou v grafu také uvedeny. Z výsledků jasně vyplývá, že s přibývajícím objemovou hmotností bude vzrůstat i čas hoření. Tento fakt souvisí se vzrůstajícím množstvím materiálu ve vzorku. Vzhledem k povaze viskóznového materiálu se nepředpokládá, že by nastal snižující se trend času hoření při vyšších objemových hmotnostech.

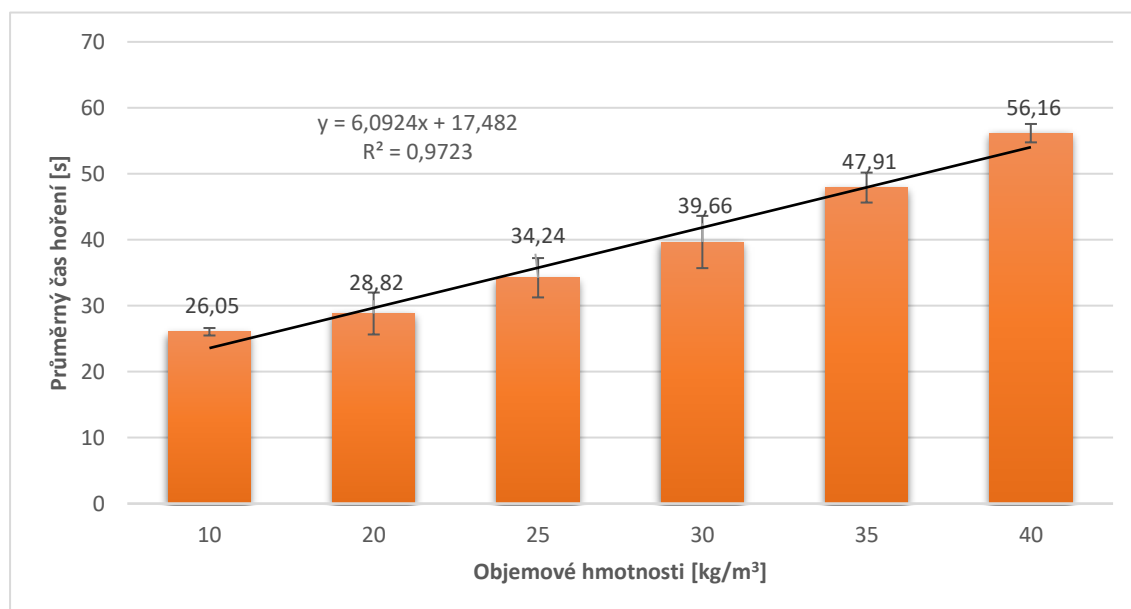
Tabulka č. 9 – Základní popisná statistika 100V pro ISO 3795

| Statistická veličina [s] | Objemové hmotnosti [kg/m ³] | | | | | |
|--------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| Střední hodnota | 81,69 | 95,46 | 109,62 | 123,79 | 151,54 | 179,29 |
| Chyba střední hodnoty | 3,19 | 2,83 | 3,51 | 4,87 | 4,02 | 9,09 |
| Medián | 81,69 | 95,46 | 109,62 | 123,79 | 151,54 | 179,29 |
| Směrodatná odchylka | 6,39 | 5,66 | 7,02 | 9,73 | 8,04 | 18,17 |
| Rozptyl výběru* | 40,82 | 32,07 | 49,33 | 94,68 | 64,67 | 330,2 |
| Minimum | 74,96 | 89,46 | 102,62 | 114,14 | 142,54 | 157,72 |
| Maximum | 88,41 | 101,46 | 116,62 | 133,43 | 160,54 | 200,85 |
| Dolní mez 95 % IS | 71,52 | 86,45 | 98,44 | 108,3 | 138,74 | 150,37 |
| Horní mez 95 % IS | 91,85 | 104,47 | 120,8 | 139,27 | 164,34 | 208,2 |

*jednotka [s²]

U objemové hmotnosti **40 kg/m³**, lze pozorovat výkyv neměřeného času, i rozptyl u této objemové hmotnosti byl několikanásobně větší. Chyba střední hodnoty v tomto případě byla také dvojnásobná.

2. Vertikální metoda



Graf č. 2 – Výsledky hoření 100V pro VW 01000 (PV 3357)

Zde se projevila větší „agresivita“ testu, jelikož oproti horizontální metodě, jsou na stejných vzorcích naměřeny kratší časy hoření. Nicméně i tento test potvrdil, že

s přibývajícím objemovou hmotností se prodlužují i časy hoření. Z **grafu č. 1** i **č. 2** je vidět, že tento vztah je téměř lineární.

Tabulka č. 10 – Úbytky a rychlost hoření 100V pro VW 01000 (PV 3357)

| | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Objemové hmotnosti [kg/m³] | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| Hmotnostní úbytky [%] | 99,03 | 99,01 | 99,04 | 99,08 | 99,12 | 99,46 |
| Rychlost hoření [g/min] | 7,72 | 8,33 | 7,18 | 6,49 | 6,89 | 7,90 |

U vertikální metody probíhalo zároveň měření hmotnostních úbytků, které ukazuje **tabulka č. 10**. Díky této informaci bylo možné dopočítat i rychlost hoření. Z tabulky lze vyčíst, že všechny **100V** vzorky shořely na **99 %** což zároveň dokazuje, že i tato jednoduchá metoda je schopna odhalit procento nespalitelných zbytků (v tomto případě **1 %**), což odhalila i TGA (**viz 4.1 TGA**). Rychlosti hoření jsou víceméně stejné **±1 g/min**, což dokazuje že objemová hmotnost neovlivňuje rychlost hoření.

Tabulka č. 11 – Základní popisná statistika 100V pro VW 01000 (PV 3357)

| Statistická veličina [s] | Objemové hmotnosti [kg/m³] | | | | | |
|---------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| Střední hodnota | 26,05 | 28,82 | 34,24 | 39,66 | 47,91 | 56,16 |
| Chyba střední hodnoty | 0,57 | 3,18 | 2,98 | 3,96 | 2,27 | 1,40 |
| Medián | 26,05 | 28,82 | 34,24 | 39,66 | 47,91 | 56,16 |
| Směrodatná odchylka | 1,13 | 6,36 | 5,97 | 7,92 | 4,54 | 2,79 |
| Rozptyl výběru* | 1,28 | 40,41 | 35,60 | 62,78 | 20,61 | 7,79 |
| Minimum | 24,80 | 22,34 | 27,72 | 32,37 | 42,70 | 52,98 |
| Maximum | 27,30 | 35,30 | 40,76 | 46,95 | 53,12 | 59,34 |
| Dolní mez 95 % IS | 24,25 | 18,70 | 24,75 | 27,05 | 40,69 | 51,72 |
| Horní mez 95 % IS | 27,85 | 38,93 | 43,73 | 52,27 | 55,13 | 60,60 |

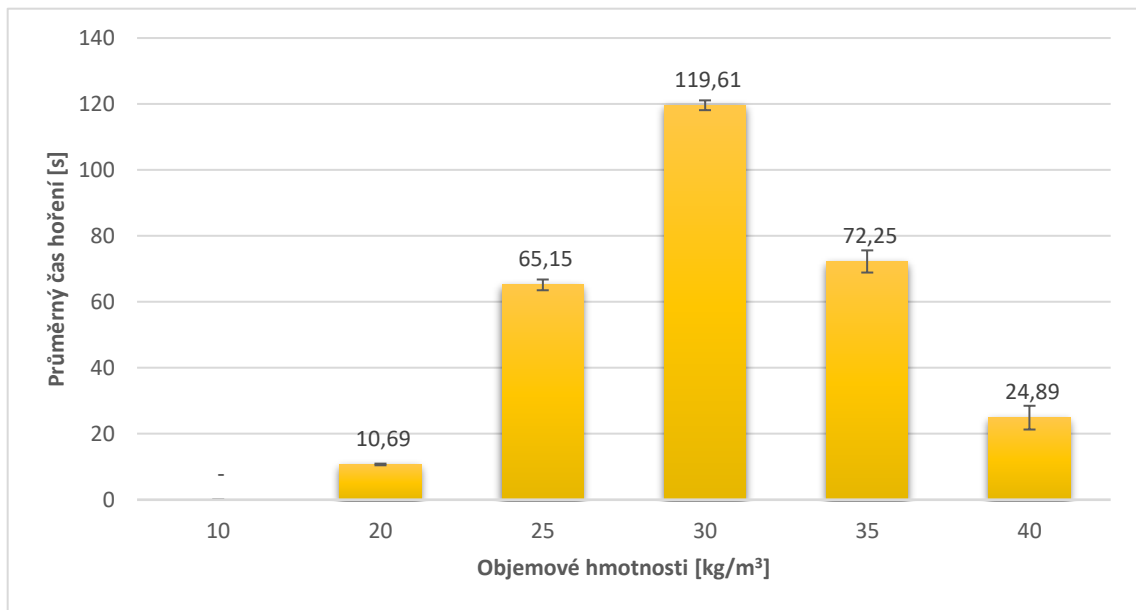
*jednotka [s²]

V tomto případě je chyba střední hodnoty u všech vzorků minimální. Stejně jako v předešlém případě mají mediány vzestupný trend. Směrodatná odchylka, a tedy i rozptyl, mají stejně jako v předešlém případě větší výkyvy.

4.3 75V 25P

Zde se očekávalo, že vzorky vzhledem k stále velkému podílu hořlavých vláken budou bez problému hořet a zároveň se předpokládalo, že časy hoření se zkrátí. Také zde byla domněnka, že se nezmění trend se vrůstající objemovou hmotností, který byl nalezen u 100V.

1. Horizontální metoda



Graf č. 3 – Výsledky hoření 75V 25P pro ISO 3795

Již na první pohled je zřejmé, že chování **75V 25P** je oproti **100V** absolutně rozdílné. Objemová hmotnost **10 kg/m³** nehořela vůbec, **20 a 40 kg/m³** shořelo přibližně z jedné třetiny, **25 a 35 kg/m³** shořelo cca ze tří čtvrtin a jako jediný celý shořel **30 kg/m³**. Zde je tedy hořlavost materiálu, velmi ovlivněna již malým podílem nehořlavých vláken. Ve směsi je tedy hořlavost materiálu citlivá právě na objemovou hmotnost vpichované netkané textilie. U průměrných časů hoření stále platí vrůstající trend s objemovou hmotností, ale jen do kritického bodu a poté se časy hoření opět zkracují.

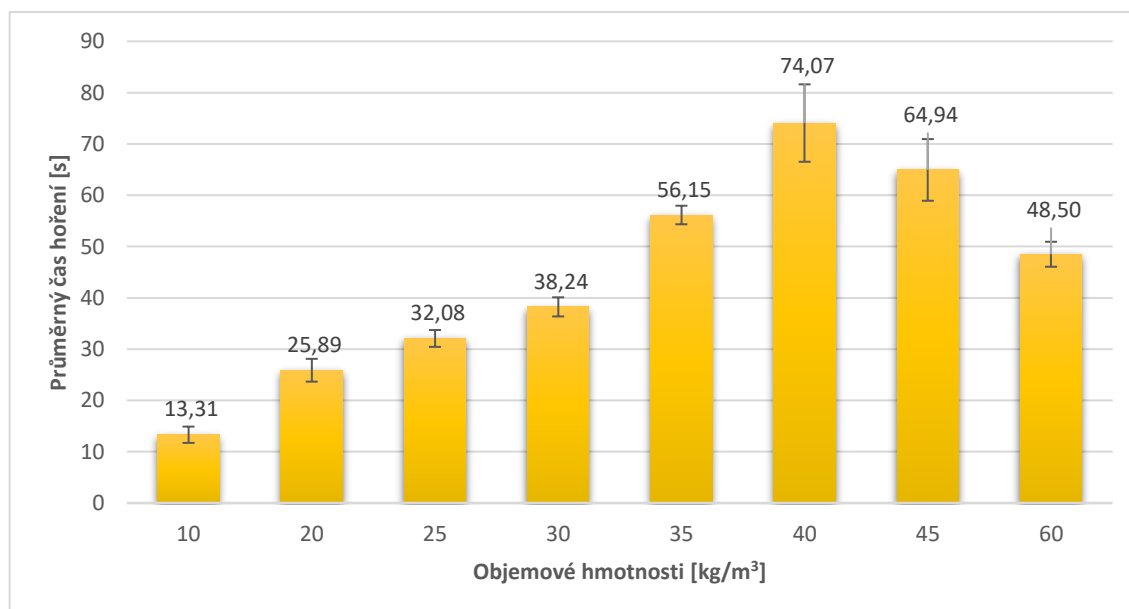
Tabulka č. 12 – Základní popisná statistika 75V 25P pro ISO 3795

| Statistická veličina [s] | Objemové hmotnosti [kg/m ³] | | | | |
|--------------------------|---|-------|--------|-------|-------|
| | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| Střední hodnota | 10,69 | 65,15 | 119,61 | 72,25 | 24,89 |
| Chyba střední hodnoty | 0,25 | 1,63 | 1,48 | 3,36 | 3,60 |
| Medián | 10,69 | 65,13 | 119,61 | 72,75 | 24,89 |
| Směrodatná odchylka | 0,51 | 3,26 | 2,97 | 6,72 | 7,20 |
| Rozptyl výběru* | 0,26 | 10,65 | 8,82 | 45,18 | 51,84 |
| Minimum | 10,09 | 61,88 | 116,61 | 65,15 | 17,29 |
| Maximum | 11,29 | 68,45 | 122,61 | 78,35 | 32,48 |
| Dolní mez 95 % IS | 9,88 | 59,95 | 114,88 | 61,55 | 13,43 |
| Horní mez 95 % IS | 11,50 | 70,34 | 124,33 | 82,95 | 36,34 |

*jednotka [s²]

Chyby střední hodnoty jsou opět minimální, ale rozptyl **10 kg/m³** se oproti **40 kg/m³** velmi liší a zdá se, že v tomto případě s přibývajícím objemovou hmotností klesá i spolehlivost měření.

2. Vertikální metoda



Graf č. 4 – Výsledky hoření 75V 25P pro VW 01000 (PV 3357)

75V 25P měl ze všech vzorků nejširší testovací řadu. V tomto případě byla vyrobena i objemová hmotnost **45 a 60 kg/m³**, jelikož **40 kg/m³** stále neměl klesající trend, který

se objevil u horizontální metody. Vertikální metoda se u těchto vzorků projevila jako méně citlivá na rozdíly v objemových hmotnostech, jelikož zde částečně hořel i vzorek s **10 kg/m³** a rozdíly v časech jsou jemněji odstupňované. Stejně jako u horizontální metody zde platí vzrůstající trend do kritického bodu a poté následuje pokles.

Tabulka č. 13 – Úbytky a rychlost hoření 75V 25P pro VW 01000 (PV 3357)

| Objemové hmotnosti [kg/m³] | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 60 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Hmotnostní úbytky [%] | 27,63 | 51,72 | 61,48 | 73,52 | 73,61 | 73,75 | 73,38 | 73,46 |
| Rychlost hoření [g/min] | 4,55 | 4,70 | 4,86 | 4,77 | 4,10 | 3,90 | 4,81 | 5,36 |

Hmotnostní úbytky hořlavých vláken dosáhly svého maxima u **30 kg/m³** (stejně jako tomu bylo u horizontální metody), avšak zde dále neproběhl pokles úbytku ani u **60 kg/m³**. Lze tedy konstatovat, že v tomto případě zvyšující se objemová hmotnost zvyšuje hořlavost materiálu, ale neprodlužuje časy hoření (respektive prodlužuje, ale jen do kritického bodu). Z tabulky lze také vypožorovat, že **75V 25P** oproti **100V** má pomalejší rychlosti hoření, čili nehořlavá vlákna mají vliv i na tento parametr. Rozdíly rychlostí napříč testovací řadou jsou však opět minimální (± 1 g/min).

Tabulka č. 14 – Základní popisná statistika 75V 25P pro VW 01000 (PV 3357)

| Statistická veličina [s] | Objemové hmotnosti [kg/m³] | | | | | | | |
|---------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 60 |
| Střední hodnota | 13,31 | 25,89 | 32,08 | 38,24 | 56,15 | 74,07 | 64,94 | 48,50 |
| Chyba střední hodnoty | 1,59 | 2,22 | 1,64 | 1,87 | 1,81 | 7,55 | 6,01 | 2,43 |
| Medián | 13,31 | 25,89 | 32,36 | 38,24 | 54,76 | 74,07 | 65,44 | 48,56 |
| Směrodatná odchylka | 3,18 | 4,44 | 3,28 | 3,73 | 3,61 | 15,09 | 12,02 | 4,87 |
| Rozptyl výběru* | 10,12 | 19,74 | 10,77 | 13,92 | 13,06 | 227,80 | 144,53 | 23,68 |
| Minimum | 9,83 | 21,18 | 28,01 | 34,38 | 53,61 | 60,13 | 52,67 | 43,14 |
| Maximum | 16,79 | 30,60 | 35,59 | 42,10 | 61,48 | 88,01 | 76,20 | 53,73 |
| Dolní mez 95 % IS | 8,25 | 18,82 | 26,86 | 32,30 | 50,40 | 50,05 | 45,81 | 40,75 |
| Horní mez 95 % IS | 18,37 | 32,96 | 37,30 | 44,17 | 61,90 | 98,09 | 84,06 | 56,24 |

*jednotka [s²]

Vzhledem k velké chybě střední hodnoty u **40 a 45 kg/m³** nelze na 100 % říci, že kritický bod je právě u **40 kg/m³**, jak zobrazuje **graf č. 4**, ale pravděpodobně bude ležet někde

mezi **40 a 45 kg/m³**. Zároveň se zde objevil i velký rozptyl u těchto objemových hmotností.

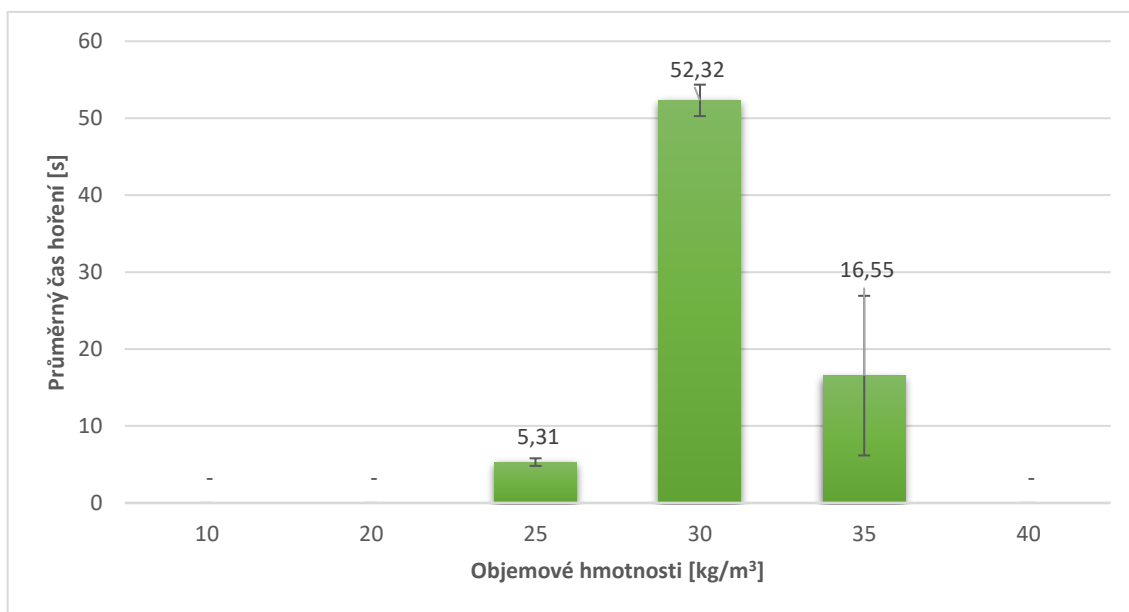
4.4 50V 50P

Hypotéza byla taková, že polovina obsahu hořlavých vláken v materiálu bude stále dostatečná pro proces hoření. Minimálně tedy u větších objemových hmotností. Také se předpokládalo radikální zkrácení naměřených časů hoření.

1. Horizontální metoda

U 50V 50P se tato metoda ukázala být neúčinná. Ani jeden ze vzorků nevzplál plamenem, a tedy nemohlo proběhnout měření.

2. Vertikální metoda



Graf č. 5 – Výsledky hoření 50V 50P pro VW 01000 (PV 3357)

Při použití vertikální metody, alespoň některé vzorky začaly hořet, ale žádný z nich neprohořel celý. Zároveň oblast objemových hmotností, kde byl plamen účinný je velmi úzká. Nicméně se zde projevuje **30 kg/m³** velmi zajímavě. U horizontální metody **75V 25P** bylo **30 kg/m³** kritickým bodem, dále u vertikální metody byla první objemovou hmotností, kdy byla spálena všechna hořlavá vlákna ve vzorku a zde u **50V 50P** reprezentuje opět kritický bod. Vypadá to, že právě tato objemová hmotnost (a její úzké okolí) v případě vpichovaných netkaných textilií disponuje vlastnostmi, které nějakým způsobem podněcují proces hoření.

Tabulka č. 15 – Úbytky a rychlost hoření 50V 50P pro VW 01000 (PV 3357)

| Objemové hmotnosti [kg/m³] | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
|--|------|------|------|-------|-------|------|
| Hmotnostní úbytky [%] | 1,75 | 1,92 | 6,88 | 39,97 | 21,28 | 0,88 |
| Rychlost hoření [g/min] | - | - | 2,15 | 1,82 | 2,22 | - |

Hmotnostní úbytky ani v jednom případě nedosáhly svého možného maxima (cca 50 %). Podíl nehořlavých vláken je již příliš velký pro řádné shoření celého vzorku. Úbytky v případech **10, 20 a 40 kg/m³** jsou pouze z místa působení plamene kahanu, ale po oddálení proces hoření nepokračoval. Při pohledu na rychlosti hoření, došlo opět k jejich poklesu oproti ostatním směšovacím poměrům, ale rozdíly v této testovací řadě jsou opět zanedbatelné ($\pm 0,2$ g/min).

Tabulka č. 16 – Základní popisná statistika 50V 50P pro VW 01000 (PV 3357)

| Statistická veličina [s] | Objemové hmotnosti [kg/m³] | | |
|---------------------------------|--|-----------|-----------|
| | 25 | 30 | 35 |
| Střední hodnota | 5,31 | 52,32 | 16,55 |
| Chyba střední hodnoty | 0,49 | 2,04 | 10,37 |
| Medián | 5,31 | 52,32 | 6,40 |
| Směrodatná odchylka | 0,98 | 4,08 | 20,74 |
| Rozptyl výběru* | 0,97 | 16,68 | 430,32 |
| Minimum | 4,37 | 48,13 | 5,74 |
| Maximum | 6,24 | 56,50 | 47,66 |
| Dolní mez 95 % IS | 3,74 | 45,82 | -16,46 |
| Horní mez 95 % IS | 6,87 | 58,82 | 49,56 |

*jednotka [s²]

Z tabulky lze vypočítat velkou chybu střední hodnoty u **35 kg/m³**, a dokonce zápornou dolní mez 95 % intervalu spolehlivosti. To je zapříčiněno tím, že jeden ze čtyř vzorků v tomto případě vzplál a hořel po delší čas (ostatní ne). Otázkou zůstává, zda tento výkyv byl způsoben špatným odběrem vzorku, či opravdu má tato objemová hmotnost ještě tendence hořet. To by případně odhalilo vícenásobné otestování tohoto případu, ale trend času hoření je jasně klesající, takže se jedná o oblast za kritickým bodem.

4.5 25V 75P

Tento směšovací poměr nehořel nezávisle na použité metodě, či objemové hmotnosti vzorku. Ani se nepředpokládalo, že by materiál s takto vysokým podílem nehořlavých vláken někdy hořel. Hmotnostní úbytky opět činili pouze **1 %**, což odpovídá místu působení plamene při počátku testu.

Na tento směšovací poměr, proběhl pokus o uplatnění Cavalieriho principu, jak již bylo zmíněno v praktické části, ale nakonec přímo tato metoda nebyla řádně použita z důvodů uvedených v předchozí části (**viz 3.4 Obrazová analýza**). Byla tedy uplatněna obrazová analýza na **51 upravených snímků z 5 stereologických řezů**. Snímky byly pořízeny na optickém mikroskopu a upravené snímky vypadaly jako **obrázek č. 20**. Ze snímků byl vyhodnocován poměr vláken v řezech, což mělo za cíl, alespoň potvrdit, že jsou směšovací poměry dodrženy.

Tabulka č. 17 – Výsledky procentuálního zastoupení vláken v jednotlivých řezech

| Řez | A | B | C | D | E | Celkový průměr |
|---|----|----|----|----|----|----------------|
| Průměrné zastoupení VS vláken [%] | 21 | 19 | 18 | 26 | 28 | 22 |
| Průměrné zastoupení PANOX vláken [%] | 79 | 81 | 83 | 74 | 72 | 78 |

Průměrně se tedy v plochách připravených řezů vyskytovala vlákna s **3 %** odchylkou oproti zamýšlenému poměru při výrobě vzorků. Vyrobené vzorky mají tedy mírně nepřesně připravené poměry, což mohlo být zapříčiněno špatnou navázkou, vlivem opotřebovaných mykacích povlaků, a tedy nedostatečnému promísení materiálu při výrobě, nebo malým počtem měření. Nicméně takto malá odchylka nemohla způsobit výraznou odchylku při testech hořlavosti.

4.6 100P

Tak jak bylo předesíláno již na základě informací o PANOX vláknech (**viz 2.2.1 PANOX® vlákna**), tak veškeré vzorky se 100 % podílem těchto vláken nehořely za žádných okolností (testováno **10, 20 a 30 kg/m³**). Dokonce ani místa přímého působení plamene nenesla zjevná poškození. Vlákna se netavila a neuvolňovala žádný specifický zápach, přestože z nich v době působení plamene stoupal bílý dým.

5 Závěr

Tato práce byla zaměřena na zkoušení hořlavosti vpichovaných netkaných textilií pomocí dvou norem. Netkané textilie byly vyráběny ze dvou druhů materiálu (PANOX a viskózová vlákna) a jejich směsí. Testovací řada také měla rozdílné objemové hmotnosti, a to od 10 do 60 kg/m³. Cílem bylo zjistit vliv změny objemových hmotností a mísících poměrů na hoření.

Součástí práce je teoretická část obsahující informace úzce spjaté s praktickou částí, která na ní navazuje. Praktická část popisuje jednotlivé kroky při výrobě a testování vzorků, včetně charakteristiky použitých norem a analýz. Poslední částí je vyhodnocení, kde jsou reprezentovány výsledky pomocí grafů a tabulek.

Během testování bylo objeveno několik trendů v hoření vpichovaných netkaných textilií. Se zvyšující se objemovou hmotností vzorků se prodlužují časy hoření, což je zapříčiněno větším množstvím materiálu pro proces hoření. Závislost mezi těmito proměnnými je téměř lineární, a to v případě obou použitých norem pro testování.

Tento trend má však v případě směsí poněkud jiný průběh. Původní tvrzení stále platí, ale tento trend má své maximum (kritický bod) a poté se naopak časy hoření snižují s rostoucí objemovou hmotností. Pravděpodobně za tento jev může příliš těsná vlákenná struktura a tím zvýšení vlivu nehořlavých vláken spolu s menším prostoupením vzduchu uvnitř textilie.

Ve směsích je také první testovací norma (horizontální metoda) mnohem citlivější na změny objemové hmotnosti a časy hoření jsou celkově delší, než tomu bylo u druhé testovací normy (vertikální metoda). Vertikální metoda, také vzhledem ke své „agresivnější“ povaze testování textilií na hořlavost, byla schopna prozkoumat i vzorky 50V 50P, což už horizontální metoda nedokázala.

Se snižujícím se obsahem hořlavých vláken se zvyšovala citlivost metod na objemovou hmotnost. Příkladem je širší testovací řady 75V 25P a 50V 50P.

Rychlosti hoření jsou snižovány s klesajícím podílem hořlavých vláken v textilii a zvyšujícím se podílem vláken nehořlavých. Vyšší podíl nehořlavých vláken znesnadňuje šíření plamene po textilii. Strukturálně jsou od sebe hořlavá vlákna více

vzdálena a plamen nedosáhne dostatečné teploty k rychlému šíření po textilií. Dále bylo objeveno, že na rychlost hoření nemá vliv objemová hmotnost textilie.

Fakt, že přibližně mezi 50 a 75 % objemu hořlavých vláken ve vpichované netkané textilií se při určitých objemových hmotnostech textilie chová jako nehořlavá (nebo minimálně hoří při přímém působení plamene, ale plamen se samovolně nešíří), znamená značnou finanční úsporu při výrobě nehořlavých materiálů za použití PANOX vláken.

Případné další testování by mělo podrobněji prozkoumat objemovou hmotnost 30 kg/m^3 , a to i po strukturální stránce, jelikož tato objemová hmotnost vykazovala velmi zajímavé vlastnosti při hoření napříč testovacími řadami. Dále by bylo možné otestovat tento typ textilií pomocí jiných norem, nebo otestování ještě vyšších objemových hmotností, než bylo v této diplomové práci použito. U směsí je totiž možné, že po dosažení určité objemové hmotnosti začnou textilie opět hořet i za kritickým bodem.

6 Použitá literatura

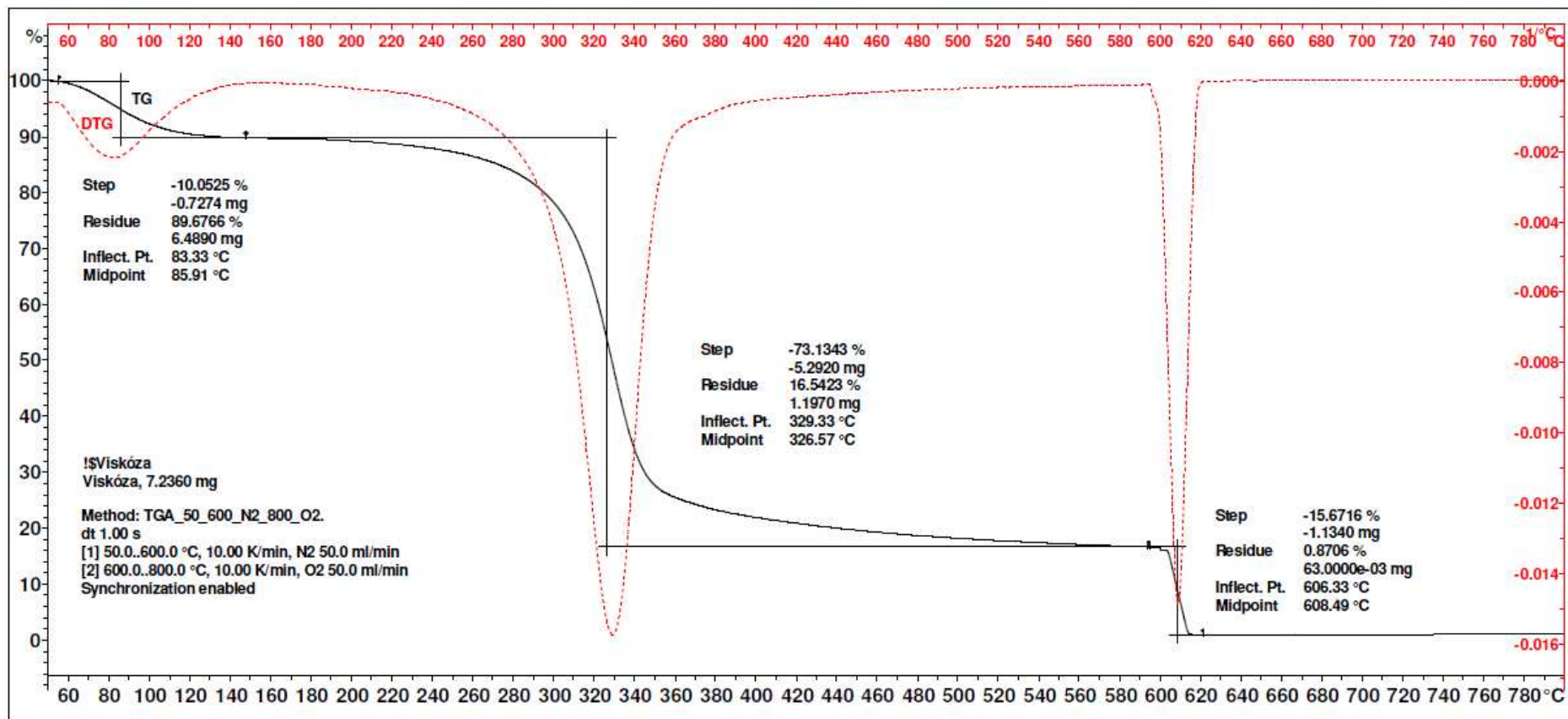
- [1]. DOSTALOVÁ, Mirka a Mária KŘIVÁNKOVÁ. *Základy textilní a oděvní výroby*. Vyd. 3., upr. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. ISBN 80-7083-831-0.
- [2]. MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002. ISBN 80-708-3644-X.
- [3]. ČSN EN ISO 9092 (800002). *Textilie - Netkané textilie - Definice: Česká technická norma*. Brno: Textilní zkušební ústav, 2019.
- [4]. sgl carbon: PANOX®. : Composites - Fibers & Materials [online]. Wiesbaden, Německo: SGL carbon group, 2018 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.sglcarbon.com/>
- [5]. KILINC, F. Selcen, ed. *Handbook of fire resistant textiles*. Cambridge: Woodhead Pub., 2013. Woodhead Publishing series in textiles, no. 140. ISBN 978-0-85709-123-9.
- [6]. POSPÍŠIL, Zdeněk. *Průručka textilního odborníka*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [7]. PAKOSTOVÁ, Věra. *Textilní vlákna: Text s semináři*. In: DOCPLAYER: *elektronická knihovna* [online]. 2010 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/107581343-Textilni-vlakna-ing-vera-pakostova.html>
- [8]. WARNER, Steven B. *Fiber science*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995. ISBN 0-02-424541-0.
- [9]. MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. [2. vydání]. V Liberci: Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [10]. JIRSKÁK, Oldřich a Klára KALINOVÁ. *Netkané textilie*, ©2003, ISBN 80-7083-746-2.
- [11]. W. Albrecht, H. Fuchs, W. Kittelmann: *Nonwovens Fabrics*, Wiley-VCH, Weinheim 2003, ISBN: 3-527-30406-1
- [12]. MRŠTINA, Václav a František FEJGL. *Textilní technologie vpichování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
- [13]. OBDRŽÁLEK, Jan. *Úvod do termodynamiky, molekulové a statistické fyziky*. Praha: Matfyzpress, 2015. ISBN 978-80-7378-287-0.

- [14]. The International System of Units (SI): Draft of the 9th SI Brochure [online]. 9th edition. Saint-Cloud, France: International Bureau of Weights and Measures, 2019 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2018.pdf>
- [15]. STEC, Anna a T. Richard HULL, ed. Fire toxicity. Cambridge: Woodhead, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-1-84569-502-6.
- [16]. *SOUHRN METODICKÝCH PŘEDPISŮ: pro činnost jednotek požární ochrany* [online]. Česká asociace hasičských důstojníků z.s.: Ministerstvo vnitra - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České Republiky, 2020 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <http://metodika.cahd.cz/>
- [17]. HORROCKS, A. Richard a Dennis PRICE. Fire retardant materials. Boca Raton: CRC Press, 2003. ISBN 0-8493-3883-2.
- [18]. SUSILO, Fallo. Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-Like Combustion of Plastics: D2863-00 [online]. ASTM International, 2017, , 1-13 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: https://kupdf.net/download/astm-d2863-00_59083e89dc0d60b51e959e7b_pdf
- [19]. HU, Jinlian. Fabric testing. Boca Raton: CRC Press, 2008. Woodhead Publishing in textiles. ISBN 978-1-84569-297-1.
- [20]. Textile testing solutions: Atlas HVM Horizontal Flammability Tester [online]. USA: SDL Atlas [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://sdlatlas.com/products/atlas-hmv-horizontal-flammability-tester#product-details>
- [21]. ČSN ISO 3795:1989. *Stanovení hořlavosti materiálů použitých v interiéru vozidla*. 2. Praha: Český normalizační institut, 1994
- [22]. VW 01000 (PV 3357:2000-12), Insulating Material, Behavior during Flame Exposure with a Burner Surface and Edge Flame Exposure, 2000
- [23]. *Digitální tloušťkoměr Elcometer 456 se sondami: Technický list* [online]. Ostrava: Gamin, 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.gamin.cz/fileadmin/user_upload/Digitalni_tloustkomer_Elcometer_456_se_sondami.pdf

7 Přílohy

Tabulka č. 18 – Výroba jednotlivých vzorků

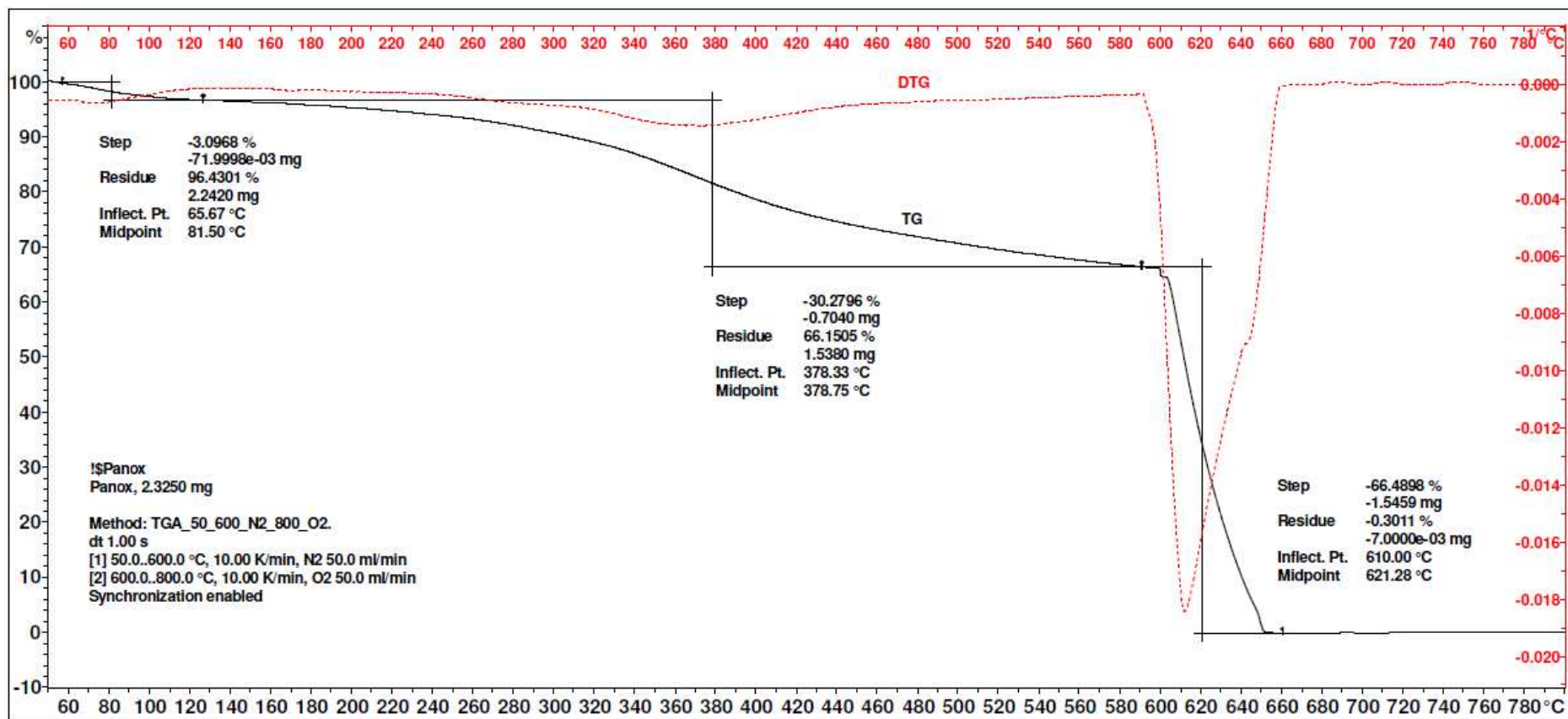
| Typ vzorku | Hloubky vpichování [mm] | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| | 1. vpichování | 2. vpichování | 3. vpichování |
| 100V (10 kg/m ³) | 0 | 0 | 0 |
| 100V (20 kg/m ³) | 0 | 2 | 4 |
| 100V (25 kg/m ³) | 0 | 4 | 3 |
| 100V (30 kg/m ³) | 5 | 5 | - |
| 100V (35 kg/m ³) | 0 | 5 | 4 |
| 100V (40 kg/m ³) | 0 | 8 | 6 |
| 75V 25P (10 kg/m ³) | 0 | 0 | 2 |
| 75V 25P (20 kg/m ³) | 2 | 4 | - |
| 75V 25P (25 kg/m ³) | 0 | 4 | 3 |
| 75V 25P (30 kg/m ³) | 5 | 5 | - |
| 75V 25P (35 kg/m ³) | 0 | 5 | 4 |
| 75V 25P (40 kg/m ³) | 0 | 8 | 5 |
| 75V 25P (45 kg/m ³) | 0 | 8 | 8 |
| 75V 25P (60 kg/m ³) | 4 | 8 | 8 |
| 50V 50P (10 kg/m ³) | 0 | 2 | 3 |
| 50V 50P (20 kg/m ³) | 0 | 4 | - |
| 50V 50P (25 kg/m ³) | 0 | 5 | 3 |
| 50V 50P (30 kg/m ³) | 0 | 5 | 5 |
| 50V 50P (35 kg/m ³) | 0 | 7 | 7 |
| 50V 50P (40 kg/m ³) | 5 | 5 | 5 |
| 25V 75P (10 kg/m ³) | 0 | 0 | - |
| 25V 75P (20 kg/m ³) | 2 | - | - |
| 25V 75P (30 kg/m ³) | 4 | 5 | - |
| 100P (10 kg/m ³) | 5 | 5 | - |
| 100P (20 kg/m ³) | 5 | - | - |
| 100P (30 kg/m ³) | 7 | - | - |



Lab: BEHALEK

STAR® SW 16.10

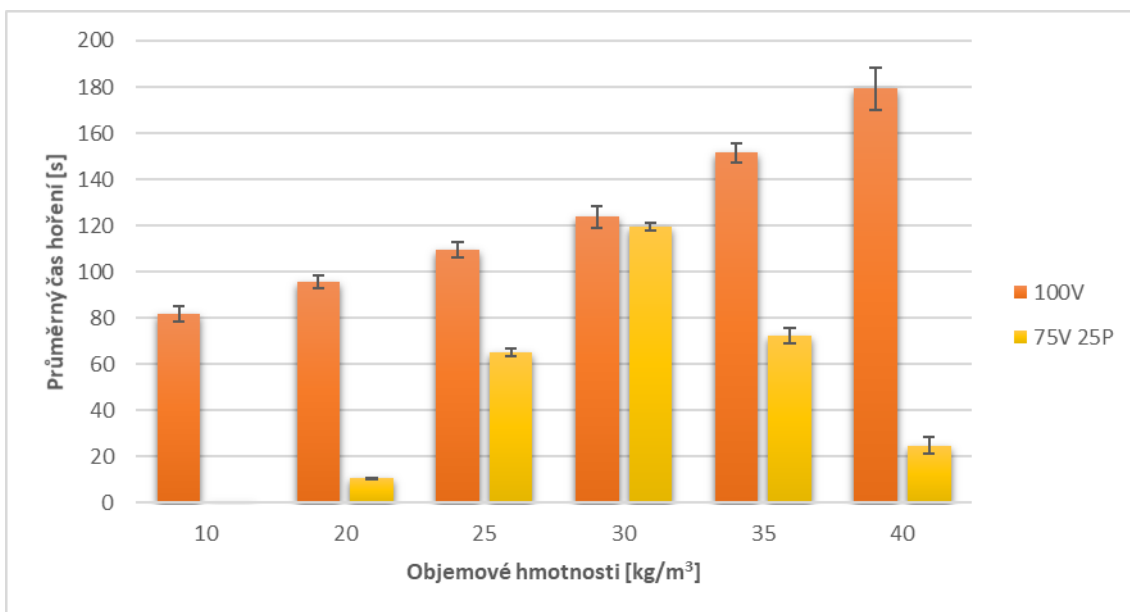
Graf č. 6 – TG a DTG křivka při testování VS vláken



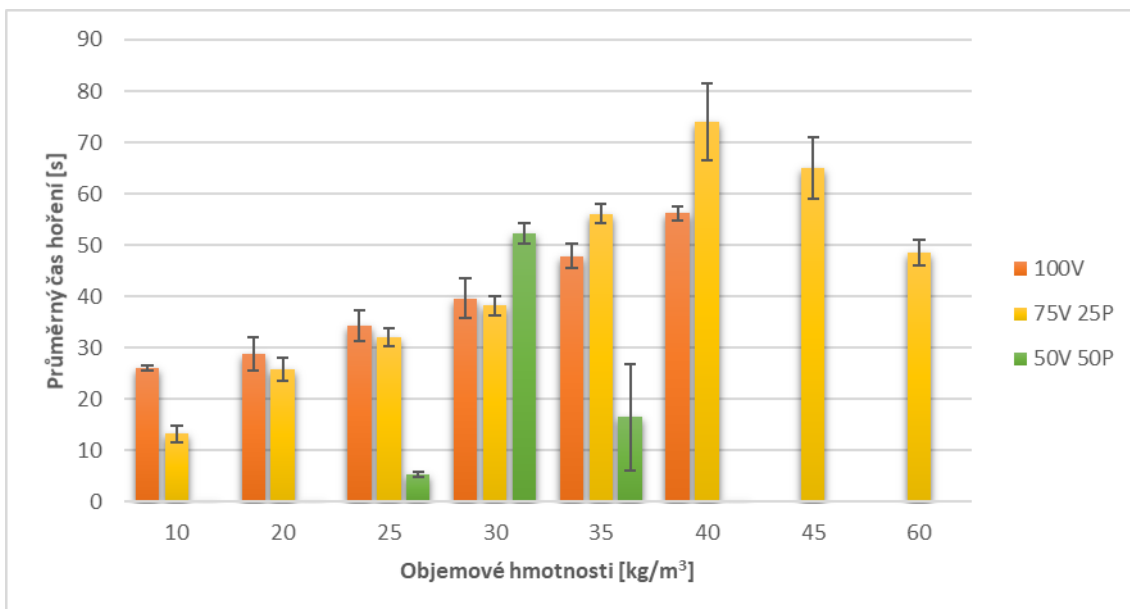
Lab: BEHALEK

STAR® SW 16.10

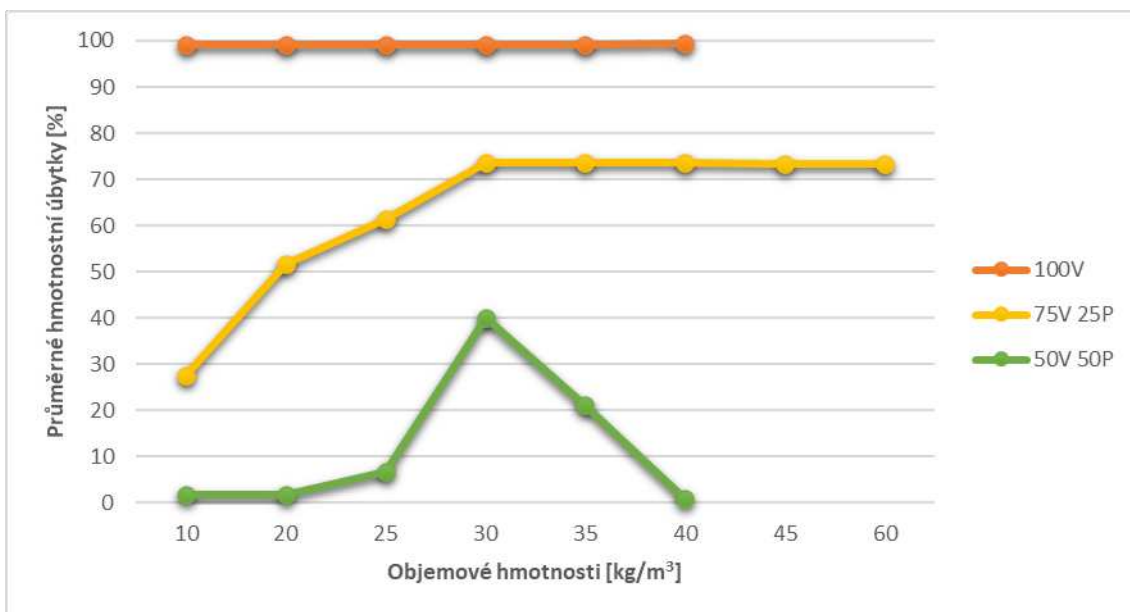
Graf č. 7 – TG a DTG křivka při testování PANOX vláken



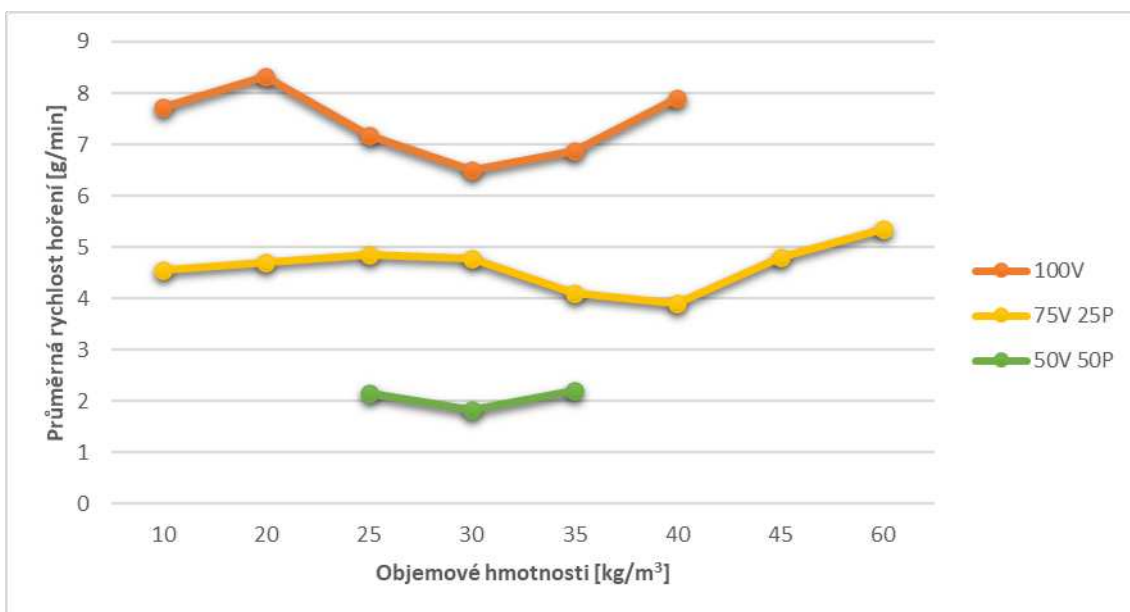
Graf č. 8 – Společný graf průměrných časů hoření pro ISO 3795



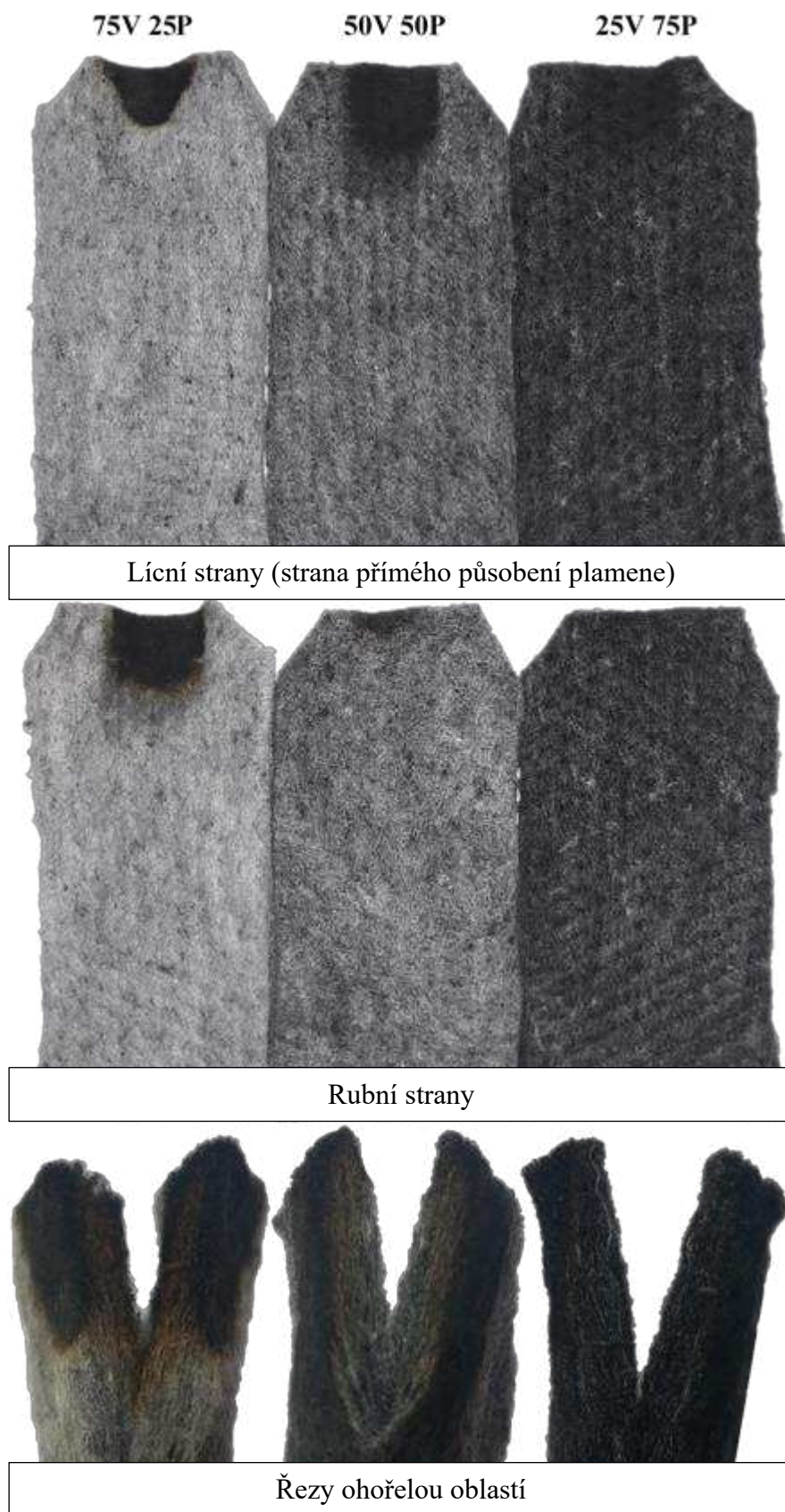
Graf č. 9 – Společný graf průměrných časů hoření pro VW 01000 (PV 3357)



Graf č. 10 – Společný graf průměrných hmotnostních úbytků pro VW 01000 (PV 3357)



Graf č. 11 – Společný graf průměrných rychlostí hoření pro VW 01000 (PV 3357)



Obrázek č. 21 – Ohořelé vzorky 10 kg/m³ pro ISO 3795