

System na bázi biologické pryskyřice při navrhování kompozitních konstrukcí

Bc. Jakub Nikl

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jakub Nikl
Osobní číslo:	T23004
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Systém na bázi biologické pryskyřice při navrhování kompozitních konstrukcí

Zásady pro vypracování

- Vypracovat literární studii na dané téma.
- Příprava semiproductů systému využívajícího pryskyřici na biologické bázi.
- Analýza a testování vytvořených semiproductů.
- Vyhodnocení dosažených výsledků.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

WANG, Meiting et al., 2023. Bio-based flame retardants to polymers: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* [online]. 6(2), 132-155 [cit. 2024-05-22]. ISSN 25425048. Dostupné z: doi:10.1016/j.aiepr.2022.07.003
COSTES, Lucie et al., 2017. Bio-based flame retardants: When nature meets fire protection. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 117, 1-25 [cit. 2024-05-22]. ISSN 0927796X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mser.2017.04.001
TAIB, Mohamad Nurul Azman Mohammad et al., 2022. Current progress of biopolymer-based flame retardant. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 205 [cit. 2024-05-22]. ISSN 01413910. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymdegradstab.2022.110153
KIM, Yukyung, Sanghyuck LEE a Hyeonseok YOON, 2021. Fire-Safe Polymer Composites: Flame-Retardant Effect of Nanofillers. *Polymers* [online]. 13(4) [cit. 2024-05-22]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13040540

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Maňas, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou použití systému epoxidových pryskyřic na biologické bázi při navrhování kompozitních konstrukcí s důrazem na ochranu kompozitních materiálů proti hoření pomocí retardantů hoření. Teoretická část práce se zaměřuje na přiblížení problematiky hoření polymerních materiálů. Popisuje látky uvolňující se hořením polymerních materiálů s negativním dopadem na životní prostředí a lidské zdraví, a to včetně retardantů hoření. Dále popisuje alternativy retardantů hoření na biologické bázi a neopomíná ani alternativní materiály na biologické bázi pro výrobu pryskyřic kompozitů. Tato práce také přibližuje možné alternativy výztuže kompozitů na biologické bázi a modifikace vláken. Praktická část diplomové práce popisuje návrhy materiálových skladeb systémů kompozitů na biologické bázi a testování jednotlivých vzorků. Součástí praktické části je také vyhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova: kompozit, epoxid, biologická báze, vlákna, hoření, retardanty hoření

ABSTRACT

This diploma thesis deals with design of bio-based epoxy resin systems of composite structures with and the protection of composite materials against fire using flame retardants. The theoretical part of the diploma thesis is focused on approaching the burning of polymer materials. It is described substances released by the burning of polymeric materials with a negative impact on the environment and human health, including flame retardants. In this paper are described bio-based flame retardants and alternative bio-based materials for the production of resin for composites. This paper also presents the development of fiber reinforcement and possible alternatives to bio-based fiber composite reinforcement and fiber modification.. The practical part of the diploma thesis describes the designs of material compositions of biologically based composite systems and the testing of individual samples. Part of the practical part is also the evaluation of the achieved results.

Keywords: composite, epoxy, biological base, fibers, combustion, flame retardants.

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Lukáši Maňasovi, Ph.D., za jeho odborné vedení a cenné rady, které mi byly nápomocny při vypracování této diplomové práce, zejména její praktické části.

Dále bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Tomáši Sedláčkovi, Ph.D. za cenné rady v oblasti dynamické mechanické analýzy.

Poděkování patří také mé rodině a přátelům, kteří mi byli oporou po dobu celého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 PROCES HOŘENÍ.....	15
1.1 POŽÁRNÍ CHARAKTERISTIKY	15
1.1.1 Hořlavost	15
1.1.2 Teplota vzplanutí.....	16
1.1.3 Teplota vznícení	16
1.1.4 Teplota hoření	17
1.1.5 Požární odolnost.....	17
1.2 HOŘENÍ	19
1.3 HOŘENÍ POLYMERŮ	21
1.4 LÁTKY UVOLŇUJÍCÍ SE PŘI HOŘENÍ POLYMERŮ	22
2 RETARDANTY HOŘENÍ.....	25
2.1 MECHANISMY RETARDACE HOŘENÍ	26
2.2 HALOGENOVÉ RETARDANTY HOŘENÍ	27
2.2.1 Tetrabromdisfenol A	28
2.2.2 Polybromované difenylethery	29
2.3 ANORGANICKÉ RETARDANTY HOŘENÍ	29
2.3.1 Hydroxidy alkalických kovů	30
2.3.2 Anorganické retardanty s fosforem	30
2.4 ORGANICKÉ RETARDANTY HOŘENÍ.....	31
2.4.1 Organické retardanty s fosforem	31
2.4.2 Silikonové retardanty	32
2.5 INTUMESCENTNÍ RETARDANTY HOŘENÍ.....	32
2.6 NANOPLNIVA.....	33
2.6.1 Grafen.....	34
2.6.2 Grafitický nitrid uhlíku	35
2.7 RETARDANTY NA BIOLOGICKÉ BÁZI	37
2.7.1 Celulóza.....	37
2.7.2 Lignin	38
2.7.3 Chitosan.....	39
2.7.4 Kasein.....	40
2.7.5 Proteiny (vaječné skořápky).....	40
3 EPOXID NA BIOLOGICKÉ BÁZI	41
3.1 EPOXIDOVÉ MONOMERY NA BIOLOGICKÉ BÁZI	42
3.1.1 Rostlinné oleje.....	42
3.1.2 Lignin	43

3.2	VYTVRZOVACÍ ČINIDLA PRO EPOXIDY NA BIOLOGICKÉ BÁZI	43
3.3	VYTVRZOVÁNÍ V MÍRNÝCH A EKOLOGICKÝCH PODMÍNKÁCH	45
3.3.1	Fotopolymerace, frontální polymerace.....	45
3.3.2	Redoxní iniciační systémy.....	46
4	POLYURETAN NA BIOLOGICKÉ BÁZI	48
4.1	POLYOLY NA BIOLOGICKÉ BÁZI	49
4.1.1	Rostlinné oleje a oleje z řas	49
4.1.2	Lignocelulózová biomasa.....	49
4.2	IZOKYANÁTY NA BIOLOGICKÉ BÁZI	50
4.2.1	Lignin	51
4.2.2	Rostlinné oleje a oleje z řas	51
4.2.3	Skořápky kešu ořechů, cukr	52
4.3	NEIZOKYANÁTOVÝ POLYURETAN	53
5	PŘÍRODNÍ VÝZTUŽNÉ MATERIÁLY	54
5.1	ROSTLINNÁ VLÁKNA	55
5.1.2	Jutové vlákno.....	56
5.1.3	Sisalová vlákna.....	56
5.1.4	Lněná vlákna	57
5.1.5	Konopná vlákna.....	58
5.2	ŽIVOČIŠNÁ VLÁKNA	59
5.2.1	Hedvábí	59
5.2.2	Vlněná vlákna.....	60
5.2.3	Péřová vlákna	61
5.3	MINERÁLNÍ VLÁKNA	62
5.3.1	Čedičová vlákna	62
5.3.2	Vlákna z karbidu křemíku	64
6	MODIFIKACE VLÁKEN A MATRICE	66
6.1	MODIFIKACE VLÁKEN.....	67
6.1.1	Oxidace.....	67
6.1.2	Modifikace plazmou.....	68
6.1.3	Modifikace nanoplňivy.....	68
6.2	MODIFIKACE MATRICE	69
6.2.1	Modifikace nanoplňivy.....	69
6.2.2	Zvýšení elektrické vodivosti	69
6.2.3	Zvýšení chemické interakce mezi matricí a výztuží pomocí vazebního činidla	70
7	ZKOUŠKY HOŘLAVOSTI	71
7.1	KÓNICKÁ KALORIMETRIE	71
7.2	PRŮTOKOVÁ KALORIMETRIE PYROLÝZNÍHO SPALOVÁNÍ	72
7.3	TERMOGRAVIMETRICKÁ ANALÝZA	72

7.4	UL 94.....	73
7.5	LIMITNÍ INDEX KYSLÍKU (LOI).....	74
II	PRAKTICKÁ ČÁST	75
8	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	76
9	VOLBA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIE VÝROBY SEMIPRODUKTŮ	77
9.1	MATRICE	77
9.1.1	System epoxidové pryskyřice I	77
9.1.2	System epoxidové pryskyřice II.....	78
9.2	VÝZTUŽ.....	79
9.3	RETARDANT	79
9.4	TECHNOLOGIE VÝROBY SEMIPRODUKTŮ	81
10	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	82
10.1	DMA.....	82
10.1.1	Výroba semiprojektu pro DMA	82
10.1.2	Výsledky DMA	85
10.2	STANOVENÍ MNOŽSTVÍ RETARDANTU	89
11	VÝROBA SEMIPRODUKTŮ.....	92
11.1	PŘÍPRAVA LNĚNÉ TKANINY PRO VÝROBU SEMIPRODUKTŮ	92
11.2	VÝROBA SEMIPRODUKTŮ BEZ PŘÍMĚSI RETARDANTU V MATRICI.....	93
11.3	STANOVENÍ MNOŽSTVÍ PŘÍMĚSI PRÁŠKOVÉHO RETARDANTU V MATRICI PRO VÝROBU SEMIPRODUKTŮ	94
11.4	VÝROBA SEMIPRODUKTŮ S PŘÍMĚSÍ RETARDANTU V MATRICI	96
11.4.1	System s příměsí retardantu ve výztuži i matrici	96
11.4.2	System s příměsí retardantu pouze v matrici	97
11.5	POST PROCESS A PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	99
12	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	101
12.1	ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI IZOD.....	101
12.1.1	Princip rázové zkoušky houževnatosti Izod	101
12.1.2	Popis provedení zkoušky Izod	102
12.1.3	Výsledky jednotlivých měření rázové zkoušky houževnatosti Izod	102
12.1.4	Vyhodnocení výsledků rázové zkoušky houževnatosti Izod	111
12.2	ZKOUŠKA OHYBEM.....	114
12.2.1	Princip zkoušky ohybem	114
12.2.2	Popis provedení zkoušky ohybem.....	115
12.2.3	Výsledky jednotlivých měření zkoušky ohybem	116
12.2.4	Vyhodnocení výsledků zkoušky ohybem.....	125
13	ZKOUŠKA HOŘLAVOSTI.....	128

13.1	VÝSLEDKY JEDNOTLIVÝCH MĚŘENÍ ZKOUŠKY HOŘLAVOSTI.....	128
13.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY HOŘLAVOSTI	136
ZÁVĚR.....		141
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		144
SEZNAM OBRÁZKŮ		155
SEZNAM TABULEK.....		158
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		160
SEZNAM PŘÍLOH.....		164

ÚVOD

V dnešní době kompozitní materiály nachází čím dál větší uplatnění v široké škále aplikací. Kompozity se však většinou skládají z materiálů pocházejících z petrochemického průmyslu. V současnosti převládá snaha o udržitelnost a snižování škodlivého vlivu průmyslu na životní prostředí. Tato snaha se nevyhýbá ani kompozitním materiálům, u kterých se zkoumá možnost náhrady materiálů na petrochemické bázi materiály na bázi biologické. Důležitým parametrem u těchto snah je však zachování vynikajících mechanických vlastností, jimiž se kompozity vyznačují. Škodlivé látky se však z kompozitů uvolňují často v případech, kdy dojde k jejich požáru a termickému rozpadu při procesu zvaném pyrolýza. Plyny uvolněné během pyrolýzy jsou většinou toxické s nepříznivým vlivem na životní prostředí a zdraví člověka.

V teoretické části této diplomové práce jsou popsány mechanismy hoření polymerů a kompozitů, pozornost je směřována také na popis škodlivých látek, které se při hoření polymerů a kompozitů uvolňují do okolí. Při snaze o omezení uvolňování těchto látek do okolí se do kompozitů přidávají látky zpomalující či zamezující hoření a pyrolyznímu rozpadu. Teoretická část diplomové práce pak tyto retardanty hoření přibližuje a popisuje jejich možné náhrady založené na biologické bázi. Dále je v této práci přiblížena problematika výztuží a matric na biologické bázi, popis jejich možných zdrojů a aplikací.

Cílem diplomové práce bylo ověření vlivu biologické složky a příměsi retardantu hoření v kompozitech na mechanické vlastnosti takových materiálů a na hořlavost. Pro tato ověření byly zvoleny dva systémy dvousložkové epoxidové pryskyřice lišící se obsahem biologické složky. Praktická část diplomové práce je věnována přípravě experimentu, výrobě několika variant semiproductů, provedení zkoušek mechanických vlastností vyrobených materiálů a jejich vyhodnocení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROCES HOŘENÍ

Proces hoření je definován jako fyzikálně-chemická exotermní reakce, při které dochází k prudké syntéze hořlavých látek s oxidačním činidlem za současného vývoje světla, tepla a zplodin hoření. Některé z těchto zplodin mohou být nebezpečné lidskému zdraví či životnímu prostředí, případně obojí najednou. Nejčastějším oxidačním činidlem je vzdušný kyslík, avšak tuto funkci mohou plnit také další látky s oxidačními vlastnostmi. [1; 2; 3]

1.1 Požární charakteristiky

1.1.1 Hořlavost

Důležitým aspektem je hořlavost látky či materiálu, přičemž jsou rozeznávány látky hořlavé a nehořlavé. Hořlavé látky zpravidla obsahují organické části a po zapálení uvolňují při požáru teplo. Látky nehořlavé neobsahují organické části a neuvolňují při požáru teplo. Hořlavé materiály v pevném skupenství se dělí do sedmi tříd reakcí na oheň stanovených normou ČSN 13501-1. Jednotlivé třídy, včetně příkladů jednotlivých materiálů, jsou znázorněny v tabulce 1. [4]

Tabulka 1 Rozdělení tříd reakce na oheň

Třída reakce na oheň	Vlastnosti	Příklady materiálu
A1	Nehořlavé	kámen, beton, cihla, minerální vlna
	nevykazují celkové vzplanutí	
A2	Téměř nehořlavé	sádrokarton, vlna ze skelných vláken
	nevykazují celkové vzplanutí	
B	Nesnadno hořlavé	překližka
	nevykazují celkové vzplanutí	
C	Hořlavé	pěna na bázi fenolu
	dojde k celkovému vzplanutí	
D	Snadno hořlavé	samozhášivý polystyren
	dojde k celkovému vzplanutí	
E	Velmi snadno hořlavé	polyuretanová pěna, dřevovláknité desky
	dojde k celkovému vzplanutí	
F	Extrémně hořlavé	obyčejný polystyren
	neklasifikované výrobky	

(zdroj: [5])

Hořlavé kapaliny se dělí podle teploty vzplanutí do čtyř tříd nebezpečnosti stanovených normou ČSN 65 0201. Teplota vzplanutí hořlavé kapaliny je stanovena akreditovanou zkušebnou. Hořlavé kapaliny, u kterých nebyl prokazatelně stanoven bod vzplanutí, jsou považovány za hořlavé kapaliny I. třídy nebezpečnosti. [4]

Tabulka 2 Rozdělení tříd nebezpečnosti hořlavých kapalin

Třída nebezpečnosti	Bod vzplanutí v °C	Příklady kapalin
I.	do 21 °C	benzin
II.	od 21 °C do 55 °C včetně	letecký petrolej
III.	od 55 °C do 100 °C včetně	motorová nafta
IV.	nad 100 °C	motorový olej

(zdroj: [4; 7])

1.1.2 Teplota vzplanutí

Teplota vzplanutí je nejnižší teplota, při které hořlavá kapalina za normálního tlaku vyvine tolik hořlavých par, že tyto pak ve směsi se vzduchem při krátkodobém přiblížení přesně definovaného otevřeného plamene krátce vzplanou, ale již dále nehoří. Při teplotách pod teplotou vzplanutí nelze kapalinu zapálit, protože tlak par látky je příliš malý k vytvoření zápalné směsi se vzduchem. To však nevylučuje nebezpečí požáru, protože zdrojem zapálení může být látka velmi rychle zahřátá na svou teplotu vzplanutí, a může dojít k požáru. [4; 11]

Teplota vzplanutí se určuje metodou otevřeného nebo uzavřeného kelímku. Při stanovení bodu vzplanutí v otevřeném kelímku je kapalina v kelímku zahřívána, a následně je k povrchu kapaliny přiblížen zdroj zapálení (plamen). Nejnižší teplota, při které dojde k iniciaci, je pak bod vzplanutí. Při metodě s uzavřeným kelímkem je postup obdobný. Teploty vzplanutí stanovené metodou otevřeného kelímku jsou o 5 až 20 °C vyšší než teploty vzplanutí stanovené metodou uzavřeného kelímku. [4]

1.1.3 Teplota vznícení

Teplota vznícení je nejnižší teplota, při které se hořlavá látka sama bez iniciace vznítí. Při stanovení teploty vznícení je vznícení vyvoláno pouze teplem, nikoliv otevřeným plamenem či jiskrou. Teplota vznícení je důležitý údaj pro skladování a manipulaci s látkami. [3; 4]

Tabulka 3 Teplota vznícení vybraných látek

Teplota vznícení vybraných látek					
Název	°C	Název	°C	Název	°C
benzin	470	nafta	250	naftalen	528
dřevo	270	hnědé uhlí	260	kaučuk	od 340
petrolej	380	černé uhlí	350	plexisklo	460
obilný prach	267	PVC	370	oxid uhelnatý	610

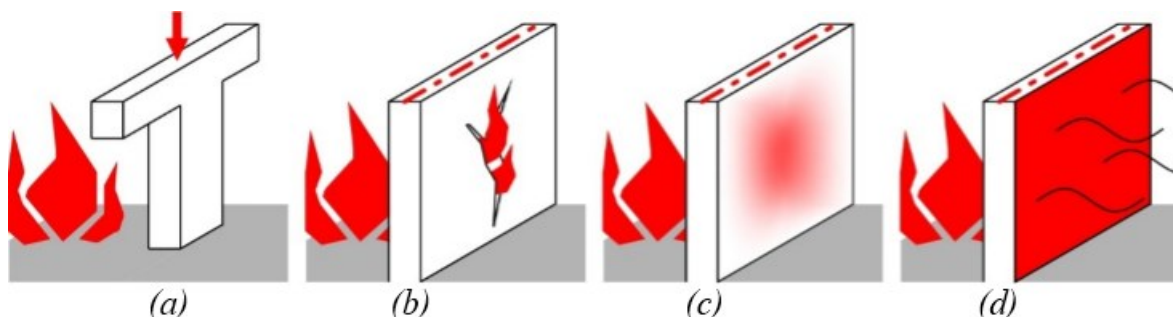
(zdroj: [4])

1.1.4 Teplota hoření

Teplota hoření je nejnižší teplota hořlavé látky, při které se vytvoří tolik hořlavých par, že se tyto páry při přiblížení otevřeného plamene vznítí a samy dále hoří. Při dosažení teploty hoření je rychlost odpařování alespoň tak velká, jako rychlost spalování. Páry se tedy tvoří v dostatečném množství a samočinné spalování se tak dále udržuje. Teplota hoření je vyšší než teplota vzplanutí. Rozdíl u nízkovroucích kapalin (při atmosférickém tlaku je bod varu nižší než 50 °C) je však mezi těmito dvěma teplotami nepatrný, ale vzrůstá se snižující se těkavostí kapaliny. [4]

1.1.5 Požární odolnost

Požární odolnost je doba, po kterou jsou schopny konstrukce nebo požární uzávěry odolávat teplotám vznikajícím při požáru bez porušení své funkce. Požární odolnost je zpravidla uváděna v minutách dle normované stupnice. Pro stavební a nosné konstrukce jsou dány normou také určitá kritéria (mezí stavy), přičemž nejpoužívanější jsou mezí stavy R, E, I a W. [15]



Obrázek 1 Hlavní mezí stavy: a) R – únosnost a stabilita, b) E – celistvost, c) I – izolační schopnost, d) W – omezení sálání

(zdroj: [15])

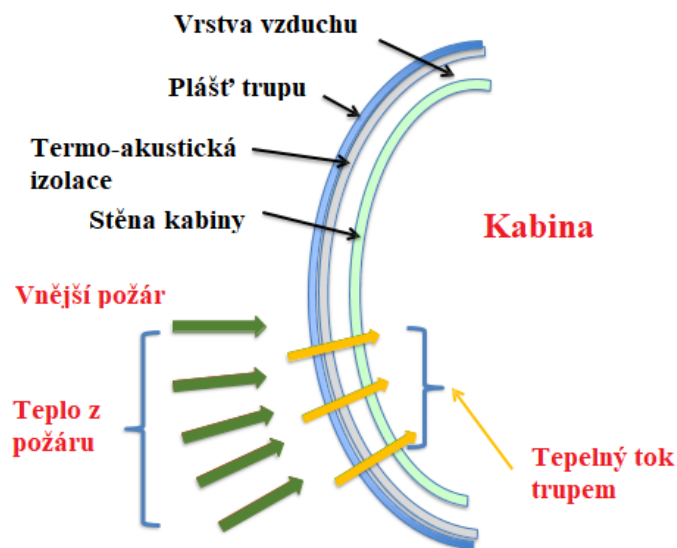
Mezní stav „R“ (únosnost a stabilita) platí pro všechny nosné konstrukce, které zajišťují stabilitu objektu – nosnou funkci musí plnit i během požáru. [15]

Mezní stav „E“ (celistvost) platí pro všechny plošné požárně dělicí konstrukce. Během požáru se nesmí v požárně dělicí konstrukci vytvořit trhлина, kterou by mohl plamen nebo horké plyny prošlehnout do jiného požárního úseku. [15]

Mezní stav „I“ (izolační schopnost) platí pro plošné požárně dělicí konstrukce, které musí zabránit nadměrnému ohřívání prostoru na straně odvrácené od požáru. Nesmí se vznítit materiál na neohřívané straně ani v její blízkosti. Při zkouškách požární odolnosti je mezní stav „I“ splněn tehdy, pokud průměrná teplota na neohřívané straně nevystoupá oproti počáteční o více než 140 °C. [15]

Mezní stav „W“ (omezení radiace tepla) platí pro plošné požárně dělicí konstrukce a jde o podobný mezní stav jako „I“, ovšem s méně přísnými požadavky. Mezní stav „W“ není schopen zabránit nárůstu teplot, pouze do určité míry omezuje tepelný tok sálající ze strany konstrukce odvrácené od požáru. Tento sálavý tepelný tok však nesmí způsobit rozšíření požáru nebo ohrozit osoby unikající v blízkosti takovéto konstrukce. Pokud ale existuje riziko požáru vně obvodové stěny (například požárně nebezpečný prostor blízké sousední budovy) a účinek požáru se snaží vniknout do interiéru, pak je potřeba požadovat přísnější požadavek „I“. [15]

U letadel má na šíření požáru vliv spalování paliva uniklého z nádrží a selhání materiálu nebo elektroniky během letu či při havárii. U běžných letadel je ochranou proti vnějšímu požáru trup vyrobený z hliníkového pláště, termo-akustické izolace, vzduchové vrstvy a vlastní stěny kabiny. Postupem času byly letadla navrhovány s čím dál větším podílem polymerních materiálů, které jsou ovšem hořlavé. Kovové materiály jsou také nahrazovány kompozitními, kde je základ tvořen vlákny (například uhlíkovými) v termoplastické pryskyřici (například epoxidové). Slitiny hliníku se taví při 660 °C, zatímco polymery, v důsledku pyrolýzy pryskyřice, při mnohem nižší teplotě (cca 380 °C). Pokud však tyto kompozitní materiály dokáží odolat požáru, který vzniká po při zahoření motoru, paliva, elektrické či mechanické závadě a zároveň pomůžou vytvořit bariéru proti vnějšímu požáru k ochraně pasažérů a posádky, pak je dovoleno tyto materiály při návrhu letadel použít. [16]



Obrázek 2 Složení vrstev vnějšího pláště letadel

(zdroj: [16])

1.2 Hoření

K tomu, aby mohlo hoření probíhat, je zapotřebí přítomnost následujících činitelů:

- **Hořlavá látka** – látky v pevném, kapalném a plynném skupenství, které za určitých podmínek reagují s oxidačním činidlem a tím se podílí na rozvoji hoření.
- **Oxidační prostředek** – nejčastěji vzdušný kyslík, ale patří sem i látky kyslík uvolňující, dále například chlór, některé kyseliny apod.
- **Iniciační zdroj** – plamen, jiskra, zdroje vzniklé přeměnou jiné energie na tepelnou (například mechanická, chemická, světelná nebo elektrická energie). [8; 11]

Hořlavá látka a oxidační prostředek spolu tvoří hořlavý soubor. Všechny tři prvky pak tvoří takzvaný **trojúhelník hoření**. Pokud jsou přítomny všechny tři prvky, probíhá proces hoření. Vyloučí-li se jedna strana trojúhelníku hoření, pak nemůže k požáru (hoření) dojít. Výjimku tvoří některé samovolně se vzněcující systémy jako například fosfor s kyslíkem, antimon s chlorem a alkalické kovy (lithium, sodík, draslík) s vodou. [3; 8; 11]



Obrázek 3 Trojúhelník hoření

(zdroj: [9])

Rozeznávají se tři druhy hoření:

- **Dokonalé hoření.**
- **Nedokonalé hoření.**
- **Explozivní hoření.**

Dokonalé hoření se vyznačuje dokonalostí proběhlé chemické reakce. Při dokonalém spalování nevznikají zplodiny schopné dalšího hoření. [3; 11; 12]

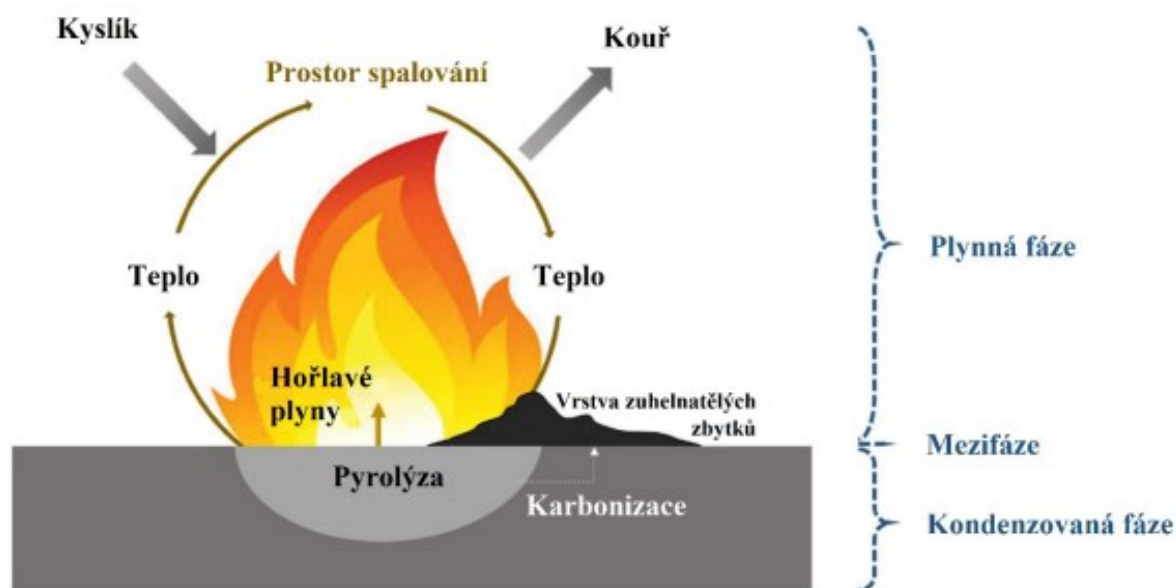
Nedokonalé spalování vzniká zejména při nedostatku dostatečného množství oxidačního činidla. Při nedokonalém hoření vznikají zplodiny schopné dalšího hoření. Častými produkty nedokonalého hoření jsou oxid uhelnatý (CO), kyanovodík (HCN), formaldehyd (CH₂O), chlorovodík (HCl), oxid siřičitý (SO₂) a další. [3; 11; 12]

Explozivní hoření může probíhat formou výbuchu, což je fyzikálně-chemická reakce doprovázená okamžitým uvolňováním velkého množství energie. [3]

1.3 Hoření polymerů

Když jsou polymery a materiály z polymerů vystaveny zvyšujícímu se teplu, dochází k jejich postupnému rozkladu. Během tohoto rozkladu jsou uvolňovány hořlavé plyny reagující s kyslíkem z okolního vzduchu za vzniku hořlavé směsi. Při dosažení dostatečně vysoké teploty dochází ke vznícení této směsi. Při spalování je následně uvolňováno další teplo, jehož část se uvolňuje zpět do směsi, čímž podporuje další rozklad polymeru. Je-li dostatek tepla k udržení rychlosti rozkladu polymeru tak, aby koncentrace těkavých látek zůstala v mezích hořlavosti, dochází k samoudržovacímu procesu hoření. [10]

Zdroj tepla zvyšuje teplotu polymeru. Toto zvyšování teploty podporuje pyrolýzu a tvorbu těkavých látek s nízkou molekulovou hmotností. Když se tyto těkavé látky spojí s kyslíkem a koncentrace dosáhne kritické úrovně, tato plynná směs se vznítí a výsledný plamen se stane zdrojem tepla pro udržení rozkladu polymeru. Pyrolýza pak probíhá, dokud nedojde k přerušení podmínek daných trojúhelníkem hoření – tzn. vyhoření materiálu, omezení přístupu vzdušného kyslíku nebo se přeruší iniciace snížením teploty. [10]



Obrázek 4 Pyrolýza polymeru při hoření

(zdroj: [10])

1.4 Látky uvolňující se při hoření polymerů

Při hoření polymerních materiálů se do ovzduší a okolí uvolňují, kromě oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého, i některé další jedovaté, karcinogenní a zdraví neprospívající látky.

Tabulka 4 Přehled některých polymerů a toxických látek vznikající jejich spalováním

Materiál	Zdroj	Toxické produkty hoření
Přez (guma)	pneumatiky	oxidy síry, kyslíkové radikály
PVC (polyvinylchlorid)	podlahové krytiny, kabely, hadice, fólie, rámy oken	chlorovodík, fosgen
polyuretany (například molitan)	izolace, výstelky čalounění	kyanovodík, amoniak, akrylonitril, oxidy dusíku
Polyester	tkaniny, oblečení	chlorovodík, fosgen
Polypropylen	fólie a obalové materiály, kobercová vlákna	aldehydy, kyslíkové radikály
Polyamid	kobercová vlákna, oblečení	kyanovodík, amoniak
Polyakrylonitril	oblečení, bytový textil, potahové materiály	kyanovodík, amoniak, akrylonitril, akrolein
Polykarbonáty	dekorativní obložení, protihlukové stěny, skleníky	denol a jeho deriváty, bisfenol

(zdroj: [12])

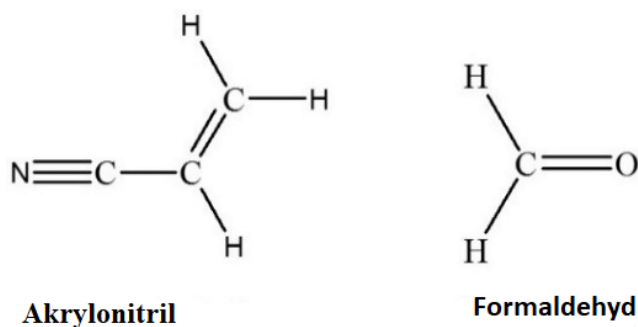
Při spalování látek obsahující dusík a uhlík vzniká **kyanovodík** (HCN). V případě polymerních materiálů je uvolňován zejména při spalování polyamidů (PA) a polyuretanu (PUR). Kyanovodík má omamný, ve větším zředění hořkomandlový zápach. Kyanidový aniont CN^- zabráňuje tkáňovému dýchání. Kyanovodík má i lehký dráždivý účinek, avšak dusivým účinkem zatlačen do pozadí. Rychle se vstřebává plicemi, žaludeční sliznicí i neporušenou kůží. Na základě vojenského použití během 1. světové války je kyanovodík řazen mezi bojové chemické látky. Během 2. světové války byl používán jako Cyklon B v plynových komorách. Smrtelná dávka pro člověka se pohybuje v rozmezí 0,04 až 0,06 gramů. Vystavení menší dávce má za následek bolest hlavy, nevolnost, závratě, pocitu sevření na prsou, ke zrychlení dýchání a ztrátě vědomí. [11; 12]

Další smrtelně nebezpečnou látkou je fosgen ($COCl_2$), někdy označován také jako dichlorid karbonylu. Za pokojové teploty je fosgen bezbarvý plyn těžší než vzduch. Při nízkých koncentracích má vůni jako čerstvě posekaná tráva. Při vyšších koncentracích je

zápach pronikavější a plyn je dráždivější. Jedná se o jednu z nejvíce toxických látek, které jsou průmyslově vyráběny. Při inhalaci se fosgen dostává do styku s vlhkými sliznicemi dýchacích cest. Působením vody z této vlhkosti je následně rozkládán za vzniku oxidu uhličitého a kyseliny chlorovodíkové. Ta dráždí a leptá sliznice. Nejzávažnějším projevem intoxikace fosgenem je otok plic. Během 1. světové války byl nasazen jako bojový plyn pod vojenským označení CG. Fosgen má však i bohaté průmyslové využití pro výrobu herbicidů, barviv a léčiv. Používá se také jako stabilizátor střelného prachu a jako meziprodukt k výrobě polyuretanové pěny (PUR). [11; 12]

Při hoření polymerů může vznikat také **akrylonitril** (vinylkyanid), což je bezbarvá těkavá kapalina štiplavého zápachu. V přírodě se přirozeně nevyskytuje. Používá se jako monomer pro výrobu polyakrylonitrilu (PAN) a celé řadě kopolymerů, například akrylonitril-butadien-styren (ABS). Při hoření těchto polymerních materiálů vzniká kyanovodík, oxidy dusíku a látky obsahující nitrilovou skupinu ($-\text{C}\equiv\text{N}$). Akrylonitril je velmi dráždivý. Při větších koncentracích může způsobovat útlum dýchání, srdeční arytmií, kardiovaskulární selhání či rozvinout edém plic. Akrylonitril je klasifikován jako karcinogenní. [11; 12]

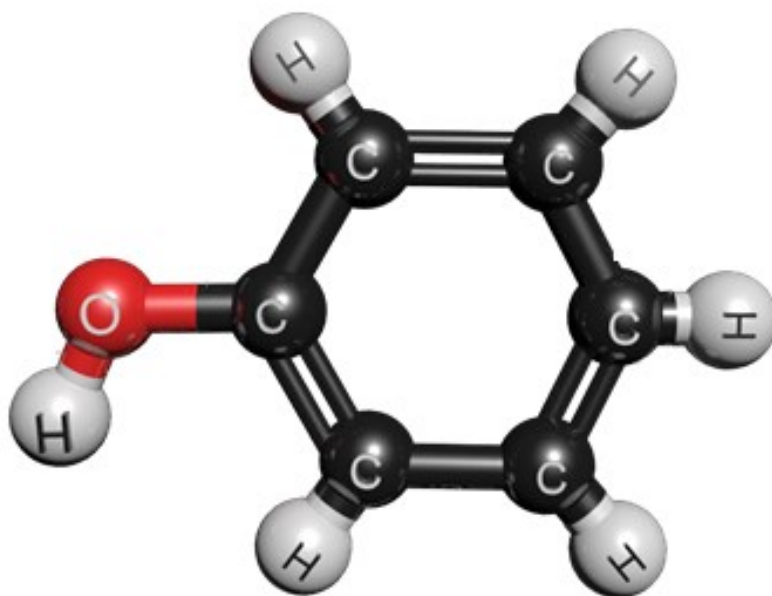
Mezi zplodinami se mohou objevovat také aldehydy. Nejjednodušším aldehydem je **formaldehyd** (methanal, CH_2O). Jedná se o bezbarvý plyn štiplavého zápachu těžší než vzduch. Je žíravý a dráždivý. Má ovšem virucidní, baktericidní a sporicidní účinky, proto se velmi často využívá k desinfekci, desinfekci uzavřených prostor a sterilizaci. Plynný formaldehyd však dráždí oči, sliznice, způsobuje bolest v krku, kašel, dušnost, a může dojít i k zúžení průdušek. Expozice očí může způsobit trvalé změny vidění či dokonce ztrátu zraku, protože vyšší koncentrace vyvolávají zákal rohovky. Formaldehyd je karcinogen, jenž může mít za následek leukémii. [12]



Obrázek 5 Znázornění molekul akrylonitrilu a formaldehydu

(zdroj: [14])

Skupina organických látek obsahující hydroxylovou skupinu (-OH) vázanou přímo na benzenové jádro se souhrnně označuje jako **fenoly**. Fenol (C_6H_5OH), jinak nazýván také kyselina karbolová, je při pokojové teplotě bezbarvá těkává krystalická látka s bodem tání $40,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Má nasládlý štiplavý zápach a ostře palčivou chuť. V přírodě vzniká rozkladem organických materiálů. Fenol a jeho deriváty jsou také součástí uhelného dehtu. Při akutní inhalační expozici dochází k intenzivnímu dráždění sliznic, očí i kůže. Způsobuje také bolest hlavy, závrať, kašel, srdeční arytmií, ve vysokých koncentracích dokonce svalovou slabost až bezvědomí. V průmyslu se využívá k výrobě léčiv a k výrobě bisfenolu A, který se dále používá k výrobě polykarbonátů a epoxidových pryskyřic. [12]



Obrázek 6 Znáznornění molekuly fenolu

(zdroj: [13])

Při hoření plastů s obsahem chlóru, například PVC (polyvinylchlorid), vzniká **chlorovodík** (HCl). Jedná se o bezbarvý plyn těžší než vzduch s výrazně štiplavým zápachem. Je také dráždivý a žravý. Plyný chlorovodík reaguje s vlhkostí sliznic za vzniku kyseliny chlorovodíkové. V nízkých koncentracích tedy proto způsobuje dráždění očí (slzení) a sliznic (kašel, dušnost, slinění). Ve vyšších koncentracích způsobuje zrychlené dýchání, otok hrdla a následně otok plic. Podobné účinky jako kyselina chlorovodíková má také kyselina bromovodíková. Ta vzniká rozpouštěním **bromovodíku** (HBr) ve vodě. Bromovodík vzniká zejména při hoření polymerních materiálů, jejichž součástí jsou bromové zpomalovače hoření. [12]

2 RETARDANTY HOŘENÍ

Retardanty (zpomalovače) hoření FR (z angl. Flame Retardants) jsou chemické látky, které zpomalují nebo zabraňují hoření a šíření požáru potlačením chemických reakcí v přímo v ohnisku požáru (plamene) nebo vytvořením ochranné vrstvy na povrchu materiálu. Retardanty mohou být smíchány přímo s materiálem (**aditivní retardanty**) nebo s ním být propojeny chemicky (**reaktivní retardanty**). [17; 19]



Obrázek 7 Příklady výrobků s retardanty hoření

(zdroj: [23])

Mezi často používané retardanty patří látky obsahující halogeny (brom, chlór), fosfor, dusík, hořčík apod. Z tohoto výčtu je patrné, že při jejich spalování může docházet k uvolňování toxických látek, a to škodlivých jak pro člověka, tak pro životní prostředí. Například sloučeniny uvolňující se při spalování retardantů na bázi bromu, které byly dříve nejpoužívanější skupinou retardantů, se akumulují v přírodě a znečišťují tak životní prostředí. [17; 18; 19]

Když výrobky s retardanty hoření dosáhnou konce své životnosti, jsou obvykle recyklovány, spalovány nebo ukládány na skládku. Recyklace těchto materiálu může způsobovat zdravotní ohrožení pracovníků, příp. znečištění a ohrožení prostředí v okolí těchto recyklačních závodů. Nedokonalé spalování těchto výrobků ve spalovnách má za následek uvolňování velkého množství toxických látek. Řízené spalování retardantů na halogenové bázi, přestože je dražší, toto uvolňování výrazně snižuje. Při ukládání na skládky dochází postupem času k vylouhování některých toxických látek, případně k jejich akumulaci v půdě, což vede k znečištění životního prostředí. Snadněji vylouhování probíhá zejména u aditivních retardantů z důvodu absence chemických vazeb se základním materiálem, jak je tomu u reaktivních retardantů hoření. Dnes je tedy snaha nahrazovat

všechny tyto potenciálně nebezpečné retardanty takovými, které budou účinné a zároveň šetrnější vůči životnímu prostředí. [17; 18; 19]

2.1 Mechanismy retardace hoření

Retardanty hoření snižují hořlavost materiálů fyzikální nebo chemickou cestou, případně jejich kombinací. Retardanty hoření se aktivují v přítomnosti plamene nebo zdroje vznícení, mohou ale také působit ještě před vlastním vznícením materiálu. [17; 22]

Chemický efekt:

- Zhášení odstraněním volných vodíkových (H) a hydroxylových (OH) radikálů v plamenu a tím omezení šíření radikálové oxidační reakce při spalování.
- Zuhelnatění – vytvoření vrstvy uhlíku vrstvy na povrchu polymeru prostřednictvím cyklizačních a síťovacích procesů, které působí jako bariéra mezi plamenem a palivem.
- Intumescence – bobtnáním se se vytvoří izolační ochranná vrstva, která poskytuje izolaci. [22]

Fyzikální efekt:

- Tepelná izolace vytvořením izolační bariéry mezi částmi hořlaviny, které hoří, a těmi dosud nespálenými.
- Chladicí účinek endotermickými reakcemi, které odvádějí teplo.
- Produkce inertních plynů, které snižují přívod kyslíku a tím zpomalují rychlost hoření.
- Ředění paliva přiváděním inertních látek do polymeru, které postupně uhašují plamen, například hydroxidy kovů. [22]

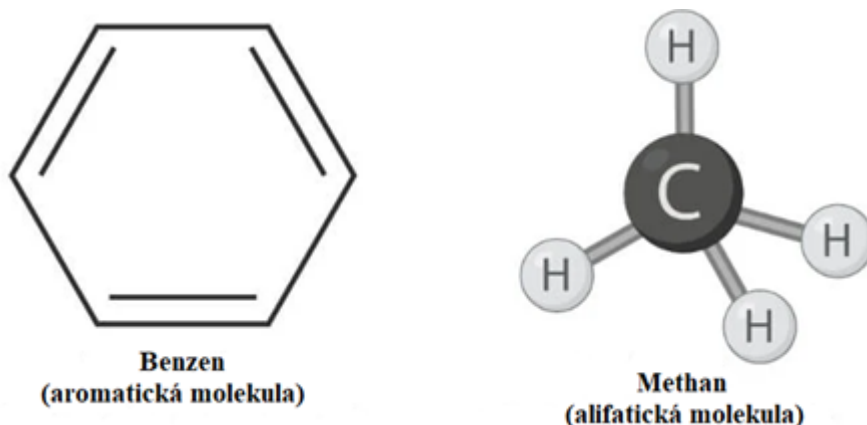
V některých případech se využívá synergického efektu kombinace různých látek retardantů, například antimonu a halogenovými retardanty, případně se kombinují různé druhy retardantů (fosfor - dusík, halogen - fosfor, apod.). [22]

2.2 Halogenové retardanty hoření

Nejpoužívanější halogenové retardanty jsou ty obsahující brom a chlór. Retardanty na bázi fluoru nebo jódu se nepoužívají, protože ani jeden z nich nereaguje v ideálním bodě. Fluor má nízkou účinnost kvůli své silné vazbě na uhlovodíky, jód má naopak slabé vazby k uhlovodíkům a horší tepelnou stabilitu. Při spalování nebo recyklaci odpadu s obsahem bromových či chlorových retardantů se mohou tvořit vysoce toxické látky ohrožující zdraví a životní prostředí. [22]

Funkce halogenových retardantů spočívá v jejich schopnosti uvolňovat aktivní atomy halogenů do plynné fáze před tím, než materiál dosáhne zápalné teploty. Během hoření jsou z materiálu uvolňovány hydroxylové a vodíkové radikály, které se vážou právě na tyto aktivní atomy za vzniku bromovodíku či chlorovodíku. Tento proces zvyšuje proces spékání polymeru na úkor vzniku těkavých hořlavých produktů hoření. To přispívá ke zpomalení hoření polymeru. Bromové retardanty jsou účinnější než ty s chlórem. Je to proto, že chlorovodík (HCl) se vytváří v poměrně širokém teplotním rozpětí. Je tedy v procesu přítomen více naředěný a ztrácí tak na účinnosti. Bromovodík (HBr) se naopak uvolňuje v úzkém teplotním rozpětí, působí tedy ve vysoké koncentraci, a proto je mnohem efektivnější. [17; 22]

Halogenové retardanty mohou být alifatické (necyklická molekula) nebo aromatické (cyklická molekula). Alifatické sloučeniny jsou méně teplotně odolné než ty aromatické, ale jsou účinnějšími retardanty. Je to proto, že se snadněji rozkládají. Právě pro jejich menší tepelnou odolnost jsou však nevhodné pro použití u polymerů s vyšší teplotní odolností, protože by se mohly rozkládat již při teplotě zpracování těchto polymerů při výrobě produktu. [17; 22]

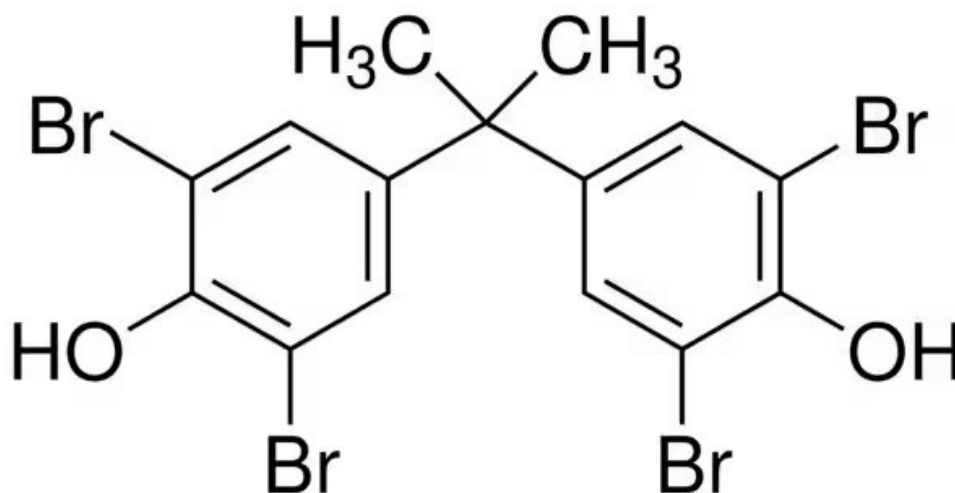


Obrázek 8 Příklad aromatické a alifatické molekuly

(zdroj: [21])

2.2.1 Tetrabromdisfenol A

Tetrabromdisfenol A (TBBPA) se většinou používá jako reaktivní meziprodukt při výrobě epoxidových pryskyřic pro výrobu tištěných spojů. Nicméně používá se i jako retardant hoření pro papír, textilní lepidla a nátěrové hmoty. I přes nízkou rozpustnost je TBBPA akumulován v sedimentech, půdě i biologických matricích. Do životního prostředí se dostává z výluhu skládek, kam jsou ukládány produkty obsahující TBBPA. TBBPA u člověka ovlivňuje zejména hormonální soustavu (nadledviny, štítná žláza, vaječníky, varlata apod.), karcinogenita ani mutagenita zatím prokázány nebyly. [17]



Obrázek 9 Znázornění tetrabromdisfenolu A (TBBPA)

(zdroj: [25])

2.2.2 Polybromované difenylethery

Polybromované difenylethery (PBDE) jsou umělé vyráběné organické sloučeniny. Podle počtu vázaných bromových skupin je lze rozdělit do tří skupin: penta-bromované, okta-bromované a deka-bromované difenylethery. Většina PBDE je lipofilní (tj. rozpustná v tucích, olejích a nepolárních rozpouštědlech), odolná vůči kyselinám, zásadám, teplu, světlu, redukčním i oxidačním reakcím. Zároveň však také představují zátěž pro životní prostředí. Jako zpomalovače hoření se uplatňují při výrobě elektroniky, automobilů, letadel, textilu a ve stavebnictví. [17; 24]

Mají však také vliv na lidské zdraví. Člověk může být PBDE vystaven vdechnutím, požitím (například tučné ryby) a kožním kontaktem. Díky svým lipofilním vlastnostem se v organismu váže na tukové tkáně. Mezi negativní účinky PBDE patří ovlivnění imunitní reakce organismu, reprodukčního cyklu a působení na vývoj další generace. Velké množství experimentálních dat dokazuje, že penta-BDE může ovlivnit funkci štítné žlázy, vaječníků i androgenních funkcí (androgeny jsou mužské pohlavní hormony). Další nebezpečí představuje vznik toxických látek při pyrolýze, jako jsou například polybromované dibenzodioxiny. [17; 24]

Bylo také zjištěno, že se PBDE usazují v životním prostředí. Z tohoto důvodu jsou v EU regulované Stockholmskou úmluvou i evropskou legislativou REACH (z angl. Registration Evaluation Authorisation and Restriction of Chemicals). Do životního prostředí se PBDE mohou uvolňovat při jejich výrobě, používání výrobků, ve kterých jsou obsaženy, a také při jejich likvidaci. V uplynulých letech byla jejich přítomnost prokázána nejen ve vzorcích vzduchu, ale i v prachu, vodě, odpadních kalcích, půdě a tkáních živočichů. [24]

2.3 Anorganické retardanty hoření

Mezi anorganické retardanty patří hlavně hydroxidy alkalických kovů, anorganické sloučeniny fosforu, bóru, křemíku či grafit. Jejich široké využití je dáno zejména vynikající tepelnou stabilitou, netěkavostí a nízkou cenou. Účinnost anorganických retardantů se zvyšuje zmenšující se velikostí částic anorganického plniva. Nevýhodou anorganických retardantů je vysoká hladina plnění, které je potřeba dosáhnout. [22; 26]

2.3.1 Hydroxidy alkalických kovů

Typickými zástupci této skupiny retardantů jsou hydroxid hlinitý $\text{Al}(\text{OH})_3$ (ATH, z angl. Aluminium Trihydroxide) a hydroxid hořečnatý $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (MDH, z angl. Magnesium Dihydroxide). ATH je dokonce ten úplně nejpoužívanější retardant. Při hoření těchto FR dochází vlivem rozkládání hydroxidů k uvolňování vodní páry, která ředí směs paliva s kyslíkem, a tím zabraňuje exotermní radikální reakci v prostoru spalování. Oxidy kovů vznikajících při spalování přilnou k povrchu matrice a vytvoří tak ochrannou vrstvu, která dále inhibuje přenos tepla a plynu. ATH také může významně snížit teplotu tepelného rozkladu PE, PP, PVC či ABS, a to pokud je objem ATH ve směsi alespoň 40 hm%. Polyolefiny obsahující 60 hm% ATH mají široké využití ve stavebnictví. MDH inhibuje nárůst teploty v materiálu hůře než ATH, a to proto, že teplota rozkladu MDH je poměrně vysoká, přibližně 340 až 490 °C. Za to však vykazuje lepší zpomalovací účinek hoření karbonizací polymeru. Kombinací ATH a MGD lze dosáhnout silného synergického efektu, který může také výrazně snížit náklady na aplikaci FR. Nevýhodami této skupiny retardantů je vysoké množství požadovaného plniva. Toto vysoké množství také vede k vyšší viskozitě materiálu při míchání a formování polymeru či pryskyřice. V kyselém prostředí se uvolňuje iont Al^{3+} , který má negativní vliv na růst a vývoj kořenů rostlin. Při dlouhodobém vystavení působení hliníku se tento hromadí v kostech a mozku, ve vysokých dávkách je neurotoxický. Omezování hliníku je však zatím řešeno pouze v potravinářském průmyslu. [17; 22; 26]

2.3.2 Anorganické retardanty s fosforem

Mezi nejpoužívanější anorganické retardanty s fosforem patří červený fosfor a polyfosforečnan amonný (APP, z angl. Ammonium Polyphosphate). Červený fosfor se stal důležitým nehalogenovým retardantem hoření díky vysoké účinnosti a synergickému účinku s mnoha dalšími retardanty. Mezi jeho nevýhody však patří snadná absorpce vzdušné vlhkosti za vzniku toxického fosfanu. Dalším rizikem je uvolňování suchého prachu, který se může vzněcovat a vybuchovat. Těmto nedostatkům se zabraňuje vytvořením povlaku červeného fosforu organickými či anorganickými povlaky. Červený fosfor je velmi účinný u materiálů obsahujících kyslík a dusík, jako jsou polyestery, polyamidy a polyuretany. Používá se ale také u skleněných vláken, termosetů a polyolefinů pro dráty a kabely. [17; 26]



Obrázek 10 Červený fosfor

(zdroj: [27])

Polyfosforečnan amonný slouží v bez halogenových systémech jako zuhelnující činidlo v barvivech, kabelech, PUR pěnách, polyesterech a epoxidových pryskyřicích. Podobně jako červený fosfor je i APP účinný u materiálů s obsahem kyslíku a dusíku. Kromě absorpce vzdušné vlhkosti patří mezi nevýhody APP také žloutnutí a křehnutí při aplikaci v papírenském průmyslu. Nevýhody anorganických retardantů s fosforem lze eliminovat mikroenkapsulací, což je speciální proces zapouzdření částic do polymerního obsahu za účelem dosažení požadovaných vlastností. Jinou možností je kombinace s dalšími aditivy. Hlavním cílem těchto modifikací je zvýšení odolnosti proti vodě, tepelné stability a zlepšení kompatibility s polymerní matricí. [17; 26; 30]

2.4 Organické retardanty hoření

2.4.1 Organické retardanty s fosforem

Organické sloučeniny fosforu poskytují dobré fyzikální vlastnosti, ale jsou dražší. Princip organických retardantů s fosforem spočívá v rozkladu systému zpomalujícího hoření za vzniku těkavých radikálů (PO , PO_2 , atd.), které mohou vázat aktivní radikály (H , OH) v plynné fázi a zastavit tak řetězovou reakci ve spalovacím procesu. Současně nehořlavý plyn produkovaný degradací organických retardantů zředí okolní vzduch a snižuje tak koncentraci kyslíku. Dochází také ke vzniku kyseliny fosforečné, která na povrchu vytvoří bariéru inhibující přenos tepla a plynu, a tak dosahuje účinku zpomalujícího hoření. Organické retardanty s fosforem mohou také dosahovat dobrého synergického účinku

s dalšími prvky, jako jsou dusík, bór apod. V poslední době bylo také vědecky zjištěno, že s obsahem sírných prvků v polymerních materiálech lze zvýšit synergický účinek organických retardantů s fosforem z důvodu reakcí fosforu se sírou. [17; 26]

2.4.2 Silikonové retardanty

Silikonové (křemičité) retardanty hoření se vyznačují vynikající tepelnou stabilitou, vysokou tepelnou odolností, odolností proti oxidaci, odolností proti hoření a šetrností k životnímu prostředí. Mají také vysokou odolnost proti vlhkosti, molekulární flexibilitu, dobrou zpracovatelnost, vynikající mechanické vlastnosti, odolnost proti nárazu a opotřebení. Skupiny obsahující křemík jsou do molekulárního řetězce polymeru zavedeny roubováním či síťováním. Na účinnost samozhášení má velký vliv typ silikonového řetězce (lineární, rozvětvený), účinnějšími jsou rozvětvené silikonové polymery. V poslední době jsou častěji aplikovány silikonové FR ze silikonové pryskyřice a polysiloxanové zpomalovače hoření, a to buď přímým zavedením silikonového retardantu hoření do polymeru nebo zalitím řady polysiloxanových segmentů s funkčními skupinami do polymerních materiálů. [17; 26]

Principem funkce silikonových retardantů hoření je, že se při zahřátí ze silikonu uvolňuje oxid křemičitý, který na povrchu materiálu vytvoří bariéru. Tímto způsobem je inhibován tepelný rozklad polymerního materiálu, a také únik produktů spalování do okolí. [17; 26]

2.5 Intumescentní retardanty hoření

Intumescentní retardanty hoření jsou složeny z několika látek, avšak neobsahují halogeny. Jsou proto šetrnější k životnímu prostředí, a mají tak velký tržní potenciál. Intumescentní systémy působí vytvořením silné uhlíkové povrchové vrstvy, která následně bobtná a izoluje tak hořlavinu od zdroje tepla a izoluje kyslík (oxidační činidlo) od povrchu. Intumescentní systém se skládá ze tří základních složek – činidla, nadouvadla a katalyzátoru. [22; 26]

Činidlem bývá anorganická kyselina nebo sloučenina, která po zahřátí dokáže vytvořit anorganickou kyselinu, jako je kyselina fosforečná nebo APP. Nadouvadlo dodává nadouvající (bobtnající) plyn. Mezi běžně používaná nadouvadla patří melamin, ethylendiamin, piperazin apod. Katalyzátor představuje hlavní zdroj uhlíku pro vytvoření uhlíkové vrstvy na povrchu, a je často složen z polyhydroxylových sloučenin s vysokým obsahem uhlíku. [22; 26]



Obrázek 11 Materiál s intumescentním retardantem po požáru

(zdroj: [28])

2.6 Nanoplňiva

Nanoplňiva (NP) mají vyšší poměr povrchu k objemu a povrchovou energii než jejich mikročasticové protějšky, což podporuje silnější interakce s jinými NP a vede ke zlepšení vlastností, včetně mechanického výkonu, vodivosti, elektromagnetického stínění a retardace hoření. Míra, do jaké se fyzikální a chemické vlastnosti kompozitůlepší přidáním NP, závisí do značné míry na stupni disperze a také na velikosti nanočástic. Obecně platí, že čím menší je velikost nanočástic, tím větší je efekt retardace hoření. [29]

Mezi hlavní výhody patří zvýšená tepelná stabilita a účinná protipožární ochrana při velmi nízkém obsahu nanoplňiv, což je pro průmysl velmi atraktivní díky nízkým nákladům a snadnému zpracování. NP zlepšují retardační účinek tím, že zvyšují tvorbu uhlíku, snižují rychlost uvolňování tepla, prodlužují dobu vznícení a snižují emise hořlavých těkavých látek při požáru. Účinnost NP však výrazně závisí chemické struktury nanočástic a na jejich geometrickém tvaru, tj. na tom, zda jsou dvourozměrné (vrstevnaté, tj. deskovité), jednorozměrné (vláknité) nebo bezrozměrné (časticové). Dvourozměrné vykazují nejlepší retardační účinky, naopak jednorozměrné nejhorší. [26; 29]

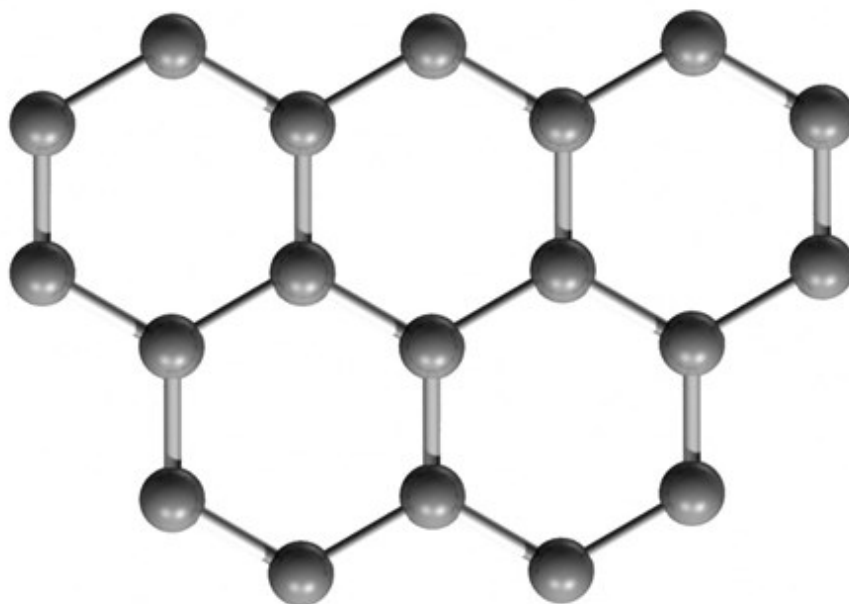
Příkladem jednorozměrných (vláknitých) nanočástic jsou uhlíkové nanotrubičky, které se používají jako alternativa konvenčních retardantů hoření, jelikož se přidávají v malém množství (do 3 hmotnostních %). Nanotrubičky vytváří strukturovanou síť, která působí jako ochranný štít a přítomnost uhlíkových nanotrubiček zároveň zvyšuje tepelnou vodivost polymeru. [17]

Mezi dvourozměrná nanoplňiva patří nanojíly, zejména vrstevnaté silikáty, z nichž je nejlevnější a nejběžněji používaný montmorillonit (MMT). Nanočástice působí na rozhraní mezi polymerní kondenzovanou a plynnou fází. Nanočástice se díky tepelné degradaci hromadí na povrchu hořícího materiálu, kde tvoří bariéru zpomalující uvolňování hořlavých plynů a zároveň působící jako tepelný štít. [17; 29]

Z bezrozměrných materiálů se používají zejména nanočástice oxidů kovů, a to zejména kvůli své nízké ceně a nízké toxicitě. Především pro oxidy titanu a zinku platí, že jsou odolné účinku UV záření, a i díky svým antimikrobiálním vlastnostem jsou často využívány pro vlákna textilních oděvů. Oxidy kovů tvoří na povrchu materiálu ochrannou vrstvu, která během spalování brání přístupu kyslíku. Například oxid zinečnatý (ZnO) díky své vysoké tepelné vodivosti a tepelné kapacitě dokáže absorbovat teplo z hoření, a tak zpomalit tepelnou degradaci polymerů. [29]

2.6.1 Grafen

Grafen je považován za alotrop uhlíku, kde jsou všechny atomy uhlíku spojeny a uspořádány do šestiúhelníkové mřížky, jednotlivé vrstvy mezi grafenem jsou k sobě vázány Van der Waalsovými silami. Díky bohatému elektronově vodivému povrchu je grafen vhodný pro použití v aplikacích vyžadující vysoký přenos elektronů a nábojů. Kromě těchto vlastností, využívaných zejména v elektronice, nabízí grafen také vysokou mechanickou pevnost. Ve formě planární (plošné) destičky je grafen také dvourozměrným nanoaditivem. Grafenové nanodeštičky (GNP, z angl. Graphene Nanoplatelets) se vyznačují dobrým odvodem tepla, vynikající tepelnou vodivostí, výbornými mechanickými vlastnostmi, zejména vynikající pevností v tahu, vynikající požární odolností a nízkou cenou. Na rozdíl od silikátových nanojílů obsahuje grafen menší atomy uhlíku. Povrch grafenových desek je proto větší než u nanojílů. To poskytuje GNP vyšší retardační účinek. [29; 37]



Obrázek 12 Grafen

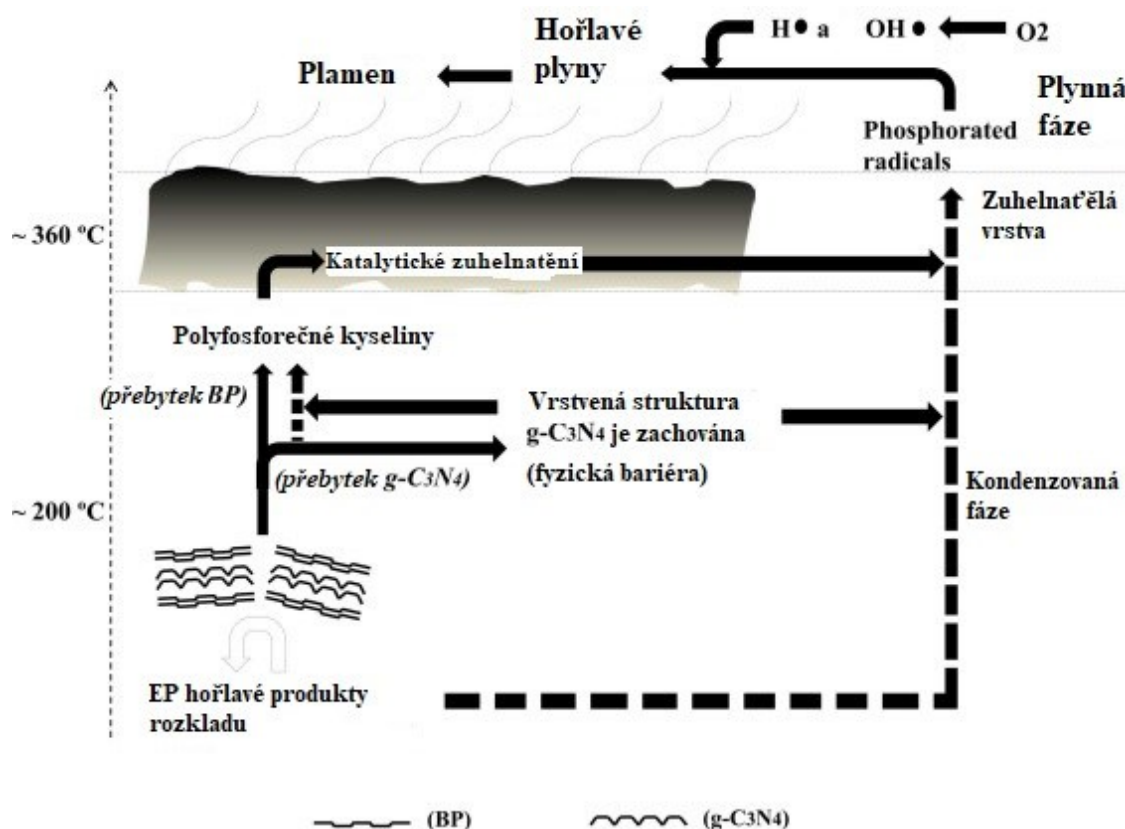
(zdroj: [31])

Retardační účinek grafenu a jeho derivátů spočívá v zachytávání volných radikálů v plynné fázi a vytváření zuhelnatělé vrstvy v kondenzované fázi. Jedním z těchto derivátů grafenu je oxid grafenu (GO), který je složen z grafenové nanovrstvy s funkčními skupinami obsahující kyslík, jako jsou karboxylové ($-\text{COOH}$), hydroxylové ($-\text{OH}$) či karbonylové ($\text{C}=\text{O}$) skupiny. Tyto funkční skupiny mohou ředit hořlavé plyny vznikající při hoření a také mohou zlepšit bariérní účinek. Jako FR má tedy oxid grafenu vyšší účinnost než GNP, a to zejména u materiálů obsahující epoxidovou pryskyřici. [29; 37]

2.6.2 Grafitický nitrid uhlíku

Grafitický nitrid uhlíku ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) má vrstevnatou strukturu podobnou grafenu, která je složena z triazinových nebo heptazinových jader. Na rozdíl od grafenu se však $\text{g-C}_3\text{N}_4$ nevyznačuje výbornou vodivostí, což značně omezuje jeho aplikace v elektronice. Podobně jako grafen se i grafitický nitrid uhlíku řadí mezi dvourozměrná nanoplňiva. $\text{g-C}_3\text{N}_4$ je vyráběn pyrolýzou močoviny (diamid kyseliny uhličitě, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) nebo ethylendiaminu. Bariérový efekt vyvolaný nitridem uhlíku se projevuje pouze v počáteční fázi tepelného rozkladu polymeru, protože jeho vrstevnatá struktura je během spalování zcela spotřebována. Chování těchto nanokompozitů při požáru lze zlepšit kombinací nitridu uhlíku s dalšími přísadami, nejčastěji tak obsahuje také $-\text{NH}$ a $-\text{NH}_2$ skupiny, které mohou být dále modifikovány za účelem zlepšení jeho katalytického účinku a rozptýlenosti

(dispergovatelnosti). Jednou z používaných modifikací je kombinace $g-C_3N_4$ s černým fosforem (BP, z angl. Black Phosphorus), což je nanoplivo složeno z trojmocných atomů fosforu s kovalentními vazbami. Retardační účinek pak zahrnuje plynnou i kondenzovanou fázi. Při hoření polymerů produkují vrstvy BP v kondenzované fázi zbytkový uhlík a fosforové radikály zachycující OH a O radikály a zabraňují tak spalování hořlavých plynů. Současně je tvořena fyzikální bariéra nanovločkami $g-C_3N_4$, které zabraňují tepelnému rozkladu BP a uvolňování hořlavých těkavých látek. [29; 36]



Obrázek 13 Mechanismus zpomalování hoření BP a $g-C_3N_4$

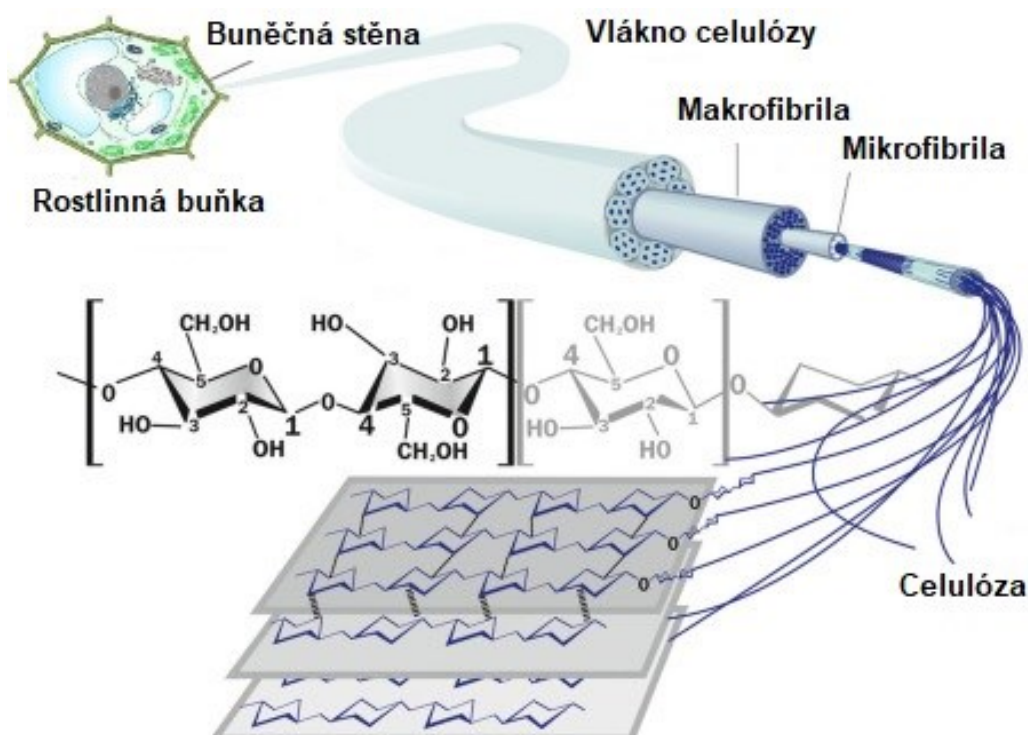
(zdroj: [36])

2.7 Retardanty na biologické bázi

Kvůli obavám o životní prostředí byly některé konvenční retardanty, zejména halogenové, zakázány. Proto byla zvýšena snaha o vývoj ekologičtějších materiálů zpomalující hoření. Z hlediska dopadu na životní prostředí je v současné době kladen důraz na využívání obnovitelných a udržitelných zdrojů. Udržitelné FR se vyrábějí ze zelených nebo biologicky odbouratelných chemikálií. Bylo také vyvinuto mnoho inovativních FR na biologické bázi vyráběných z kyseliny fytové, bílkovin, odpadu z biomasy apod. [21; 33; 35]

2.7.1 Celulóza

Celulózu, nejhojnější biopolymer, lze extrahovat z dřevní i nedřevní biomasy, řas, hub či bakterií. Celulóza je složena ze tří chemických složek – kyslík, uhlík a vodík. Polymerní řetězce jsou uspořádány v trojrozměrné struktuře, která je stabilizována vodíkovými vazbami, van der Waalsovými vazbami a hydrofobními interakcemi. Organizace celulóзовých řetězců vede ke tvorbě mikrofibril, které jsou seskupeny, a vytvářejí celulózová vlákna s obsahem krystalické i amorfni oblasti. [32; 33; 34]



Obrázek 14 Znáznornění celulózového vlákna

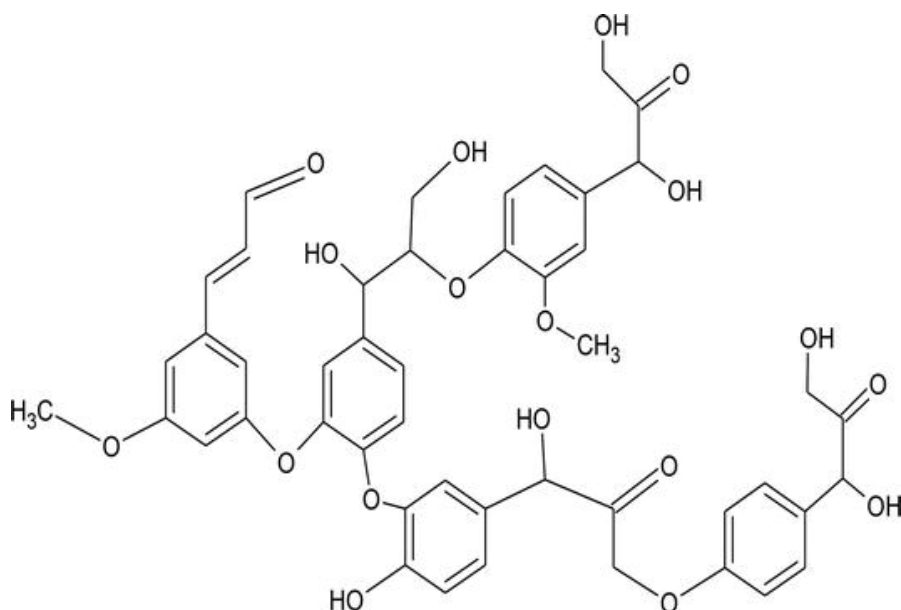
(zdroj: [34])

Celulóza se vyznačuje hydrofilními vlastnostmi, vyšší tepelnou odolností a je netoxická. Při přípravě kompozitů není kompatibilní s hydrofobními matricemi. Sama o sobě je celulóza hořlavá. Proto byly navrženy modifikace, jako jsou povrchové úpravy, aby byla zvýšena kompatibilita při prolínání s matricemi, a zlepšily se fyzikální, mechanické a tepelné vlastnosti. Ke zlepšení nehořlavosti lze také použít ochranné nátěry zpomalující hoření nebo epoxid smíchaný s anorganickými minerálními složkami, jako je oxid křemičitý a jíl, stejně jako výztužná činidla. [32; 33; 34]

Během tepelného rozkladu prochází celulóza oxidačním procesem, při kterém degraduje za vzniku zuhelnatělých zbytků. Množství vytvořených zuhelnatělých zbytků je ovlivněno podmínkami tepelné degradace a okolními složkami během pyrolýzy celulózy, jako jsou například anorganické soli přirozeně se vyskytující v biomase. Vliv také má stupeň polymerace celulózy a velikost částic. Vyšší stupeň polymerace snižuje rychlost pyrolýzy, zvětšení povrchu částic celulózy naopak zrychluje její rozklad. Ve spojení s molekulou fosforu fungují hydroxylové skupiny celulózy jako zpomalovač hoření. Přidání sloučenin fosforu do bavlněných vláken a rašelinových vláken jako zdrojů celulózy snižuje teplotu rozkladu a zvyšuje produkované uhlí. [32; 33; 34]

2.7.2 Lignin

Lignin, druhý nejhojnější biopolymer, je amorfní polymer tvořen polyaromatickými molekulami, a tvoří 15 až 25 % hmotnosti dřevin, je tak také jednou ze složek biomasy. Ročně je vyrobeno zhruba 70 milionů tun průmyslového ligninu. V kompozitech má lignin široké využití jako změkčovadlo, stabilizátor nebo mazivo. Lignin je také jedním z nejslibnějších obnovitelných zdrojů polymerních látek. Lignin má vynikající tepelnou odolnost, a proto je o něj velký zájem v souvislosti s vývojem zpomalovačů hoření. Skládá se z mnoha funkčních skupin jako je methoxyl, kabonyl, benzenové jádro atd., a často je využíván jako zdroj uhlíku pro intumescentní zpomalovače hoření. Při procesu spalování se methoxylová skupina může rozkládat za vzniku činidla zachycujícího volné radikály a ukončujícího spalovací reakci. Zároveň je uvolňován nehořlavý plyn, který snižuje koncentraci kyslíku v hořlavém systému. Karbonyl a benzenové jádro během spalování uvolňují velké množství zbytkového uhlíku a vytváří stabilní uhlíkovou vrstvu. Tato uhlíková vrstva pak účinně chrání polymerní matici před spalovacím procesem. Lignin tak může být zpomalovačem hoření v plynné i kondenzované fázi. [32; 34; 35; 47]

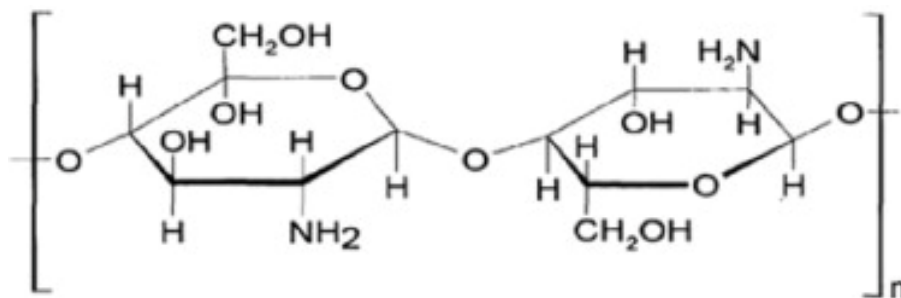


Obrázek 15 Chemická struktura ligninu

(zdroj: [38])

2.7.3 Chitosan

Chitosan je ve vodě rozpustný semikrystalický polymer, jedná se o částečně nebo plně deacetylovanou formu chitinu. Chitin, který je druhým nejrozšířenějším přírodním polysacharidem, je hlavní složkou některých živých organismů. Nachází se v buněčné struktuře hub a kvasinek, nebo ve skořápce korýšů. Často je tedy získáván právě z rozemletých skořápek krevet, krabů či humrů. Chitosan je biokompatibilní, biologicky odbouratelný a netoxický, a tak má široké využití v zemědělství či medicíně (stomatologie, bioinženýrství). Slouží také například k odstraňování toxických těžkých kovů, jako jsou rtuť, kadmium, nikl apod., z odpadních vod. Kromě toho lze chitosan aplikovat také pro zpomalování hoření. Důvodem je jeho struktura obsahující hydroxylové skupiny, které lze použít jako činidla vytvářející zuhelnatělou vrstvu v systémech zpomalovačů hoření. Chitosan se jako FR dá kombinovat s dalšími látkami, jako jsou například fosforečnany nebo montmorillonitové (MMT) jíly. [32; 34]



Obrázek 16 Chemická struktura chitosanu

(zdroj: [32])

2.7.4 Kasein

Kasein je mléčná bílkovina získávaná z výroby odstředěného mléka. Ačkoli je kasein dobře známý pro své použití ve většině mléčných výrobků, již dlouho se používá i v nepotravinářských aplikacích, jako jsou pojiva pro plasty a nátěrové hmoty. Kasein patří mezi fosfoproteiny, což je skupina proteinů bohatých na fosfor. Právě tento obsah fosforu napomáhá tomu, že tepelná degradace kaseinu je srovnatelná s APP (polyfosforečnan amonný). Kasein při spalování pomáhá zvyšovat tvorbu uhlíkové vrstvy tím, že ze svých fosfátových skupin uvolňuje kyselinu fosforečnou. Je tedy snaha o zvýšení retardačního účinku nasycením kaseinu fosforem a dalšími aktivními skupinami. Obsah kyseliny fosforečné v kaseinu má také vliv na jeho rozpustnost a tepelnou stabilitu. [33]

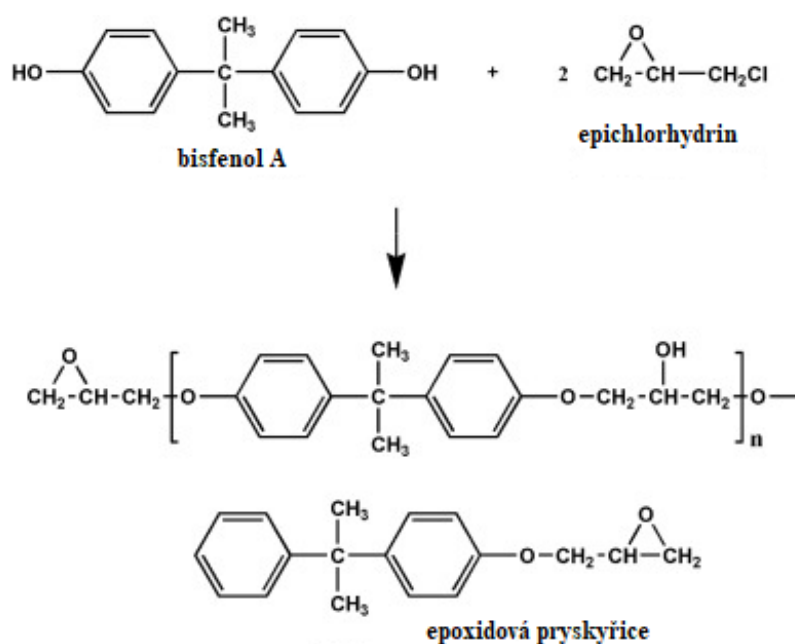
2.7.5 Proteiny (vaječné skořápky)

Existují různé druhy vaječných skořápek, například z vajíček hmyzu, ryb, plazů, obojživelníků nebo savců. Nejdostupnější jsou však skořápky slepičích vajec (CES, z angl. Chicken Eggshell). Skořápka je vlastně bio keramickým kompozitním materiálem obsahujícím několik krystalů a porézních vrstev, které umožňují průchod vody a plynů pro dýchání embryí. Struktura CES obsahuje 95 až 97 % uhličitanu vápenatého (CaCO_3), 1 % uhličitanu hořečnatého (MgCO_3) a 1 % fosforečnanu vápenatého ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) a další organické látky. CES funguje při vysokých teplotách jako nadouvadlo. Vysoký podíl CaCO_3 v CES vytváří při nadouvání oxid vápenatý (CaO), a uvolňuje tak oxid uhličitý (CO_2). Emise CO_2 uvolněného z CES během zahřívání zachycují produkty rozkladu, vytváří zuhelnatělý zbytek a způsobují expanzi. Výzkum ukázal i další možnosti využití CES jako plniva v intumescentních FR, protože při určité koncentraci dochází k synergickému efektu, a tak i zlepšení retardačního účinku. [33]

3 EPOXID NA BIOLOGICKÉ BÁZI

Díky svým vynikajícím termo-mechanickým vlastnostem jsou polymerní kompozity používány v různých oblastech. Polymerní kompozity se skládají z matrice (pryskyřice) tvořené polymery a výztuží z vláken. Mezi nejpoužívanější matrice pro výrobu kompozitů patří epoxidové pryskyřice (EP). Epoxidové pryskyřice nabízí vynikající mechanické vlastnosti, chemickou odolnost, tvarovou stálost v náročných podmínkách, vynikající adhezi a také dobrou zpracovatelnost. Epoxidy nachází své využití v široké škále aplikací, jako jsou nátěry, lepidla, solární články, automobilový a letecký průmysl. Makromolekulární struktura epoxidové pryskyřice poskytuje větší pokrytí povrchu, a proto ji lze využít jako hydrofobní antikorozi povlak. Aplikací aditiv, jako jsou vytvrzovací činidla a plniva, lze vlastnosti epoxidové matrice ještě vylepšit. [40; 70; 71; 72]

Většina produkce materiálů na bázi epoxidové pryskyřice je vyrobena epoxidační reakcí mezi epichlorhydrinem (ECH) a bisfenolem A. Kromě toho je vysoce zesíťovaná struktura epoxidových pryskyřic vytvořena vytvrzovací reakcí epoxidového monomeru a vytvrzovacího činidla. Bisfenol A je karcinogenní látka na bázi ropy. S ohledem na snahu o ochranu životního prostředí tak bylo vynaloženo velké úsilí k výzkumu epoxidových pryskyřic na biologické bázi. Mezi nejvhodnější přírodní zdroje pro výrobu bio epoxidových pryskyřic patří rostlinné oleje, sacharidy, polyfenoly nebo lignin. [70; 71; 72; 76]



Obrázek 17 Struktura epoxidové pryskyřice na bázi bisfenolu A

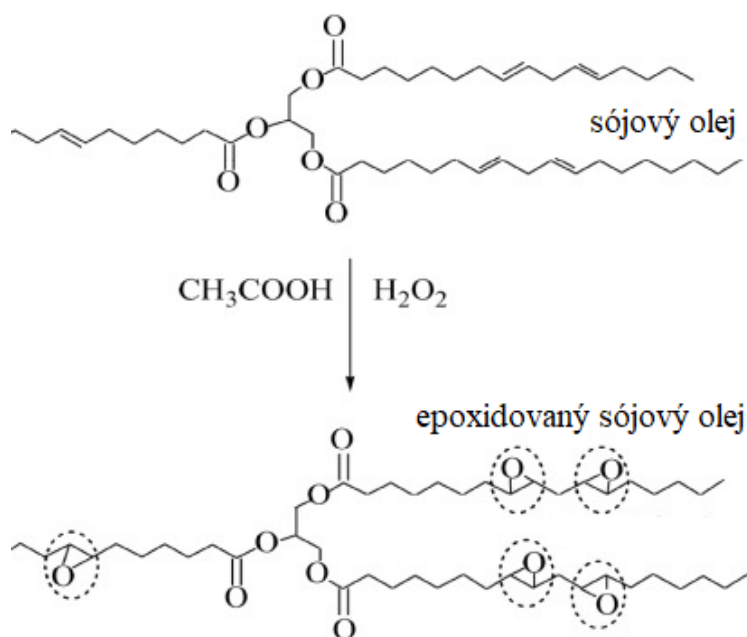
(zdroj: [74])

3.1 Epoxidové monomery na biologické bázi

Pro získání epoxidových monomerů (EM) na biologické bázi existují dvě cesty. Jedním přístupem je glycidylační reakce mezi rostlinnými fenoly a přebytkem ECH pomocí katalyzátoru. Při této metodě může fenol z biomasy přímo reagovat s ECH za vzniku epoxidového monomeru. Druhou metodou je peroxidace dvojných vazby C=C v biomase využitím H_2O_2 činidla. [76]

3.1.1 Rostlinné oleje

Rostlinné oleje, jako je sójový, lněný, řepkový nebo slunečnicový olej, jsou považovány za jeden z nejdůležitějších zdrojů epoxidů na bio bázi, a to zejména pro jejich snadnou dostupnost, obnovitelnost a nízké náklady. Výzkum však ukazuje, že tyto monomery mohou být také účinnou náhradou ftalátových změkčovačů pro PVC. Epoxidová pryskyřice na bázi rostlinných olejů vykazuje horší mechanické a tepelné vlastnosti než ta na ropné bázi. Využití proto nachází zejména u nátěrových hmot nebo lepidel. Úpravou flexibilních dlouhých řetězců mastných kyselin lze však docílit více zesíťované struktury, která vykazuje vlastnosti srovnatelné s běžnou epoxidovou pryskyřicí. Epoxidy na bázi rostlinných olejů lze také účinně mísit s běžnou epoxidovou pryskyřicí za účelem snížení viskozity pryskyřice. Přítomnost alifatických řetězců pak také celý systém zpevňuje a zvyšuje flexibilitu systému s ohledem na zlepšení pevnosti v ohybu. [70; 73; 76]



Obrázek 18 Epoxidační reakce sójového oleje

(zdroj: [70])

Potenciál mají také aplikace na bázi epoxidového vitrimeru. Vitrimer je speciální třída polymerů s jedinečnou charakteristikou termoplastů a reaktoplastů, kdy se u těchto látek určuje takzvaná přechodová teplota mrazu T_v . Pod touto teplotou vykazují vlastnosti jako reaktoplasty s vynikajícími vlastnostmi a rozměrovou stabilitou. Nad touto teplotou se chovají jako viskoelastická a tvárná tekutina. Kromě tohoto lze topologii sítě vitrimeru přeskupit, aniž by se změnila jejich hustota zesíťování. Epoxidový vitrimer na bázi rostlinných olejů se také vyznačuje dobrou recyklovatelností a takzvaným samo opravným procesem – při zahřátí na vyšší teplotu a výdrže na této teplotě dokáže zacelit trhliny vzniklé mechanickým porušením. Mezi oblasti aplikace epoxidových vitrimerů pak díky těmto vlastnostem patří opravitelná lepidla, opravitelné povlaky, biomedicínské aplikace nebo udržitelná matrice pro kompozitní materiály. [75]

3.1.2 Lignin

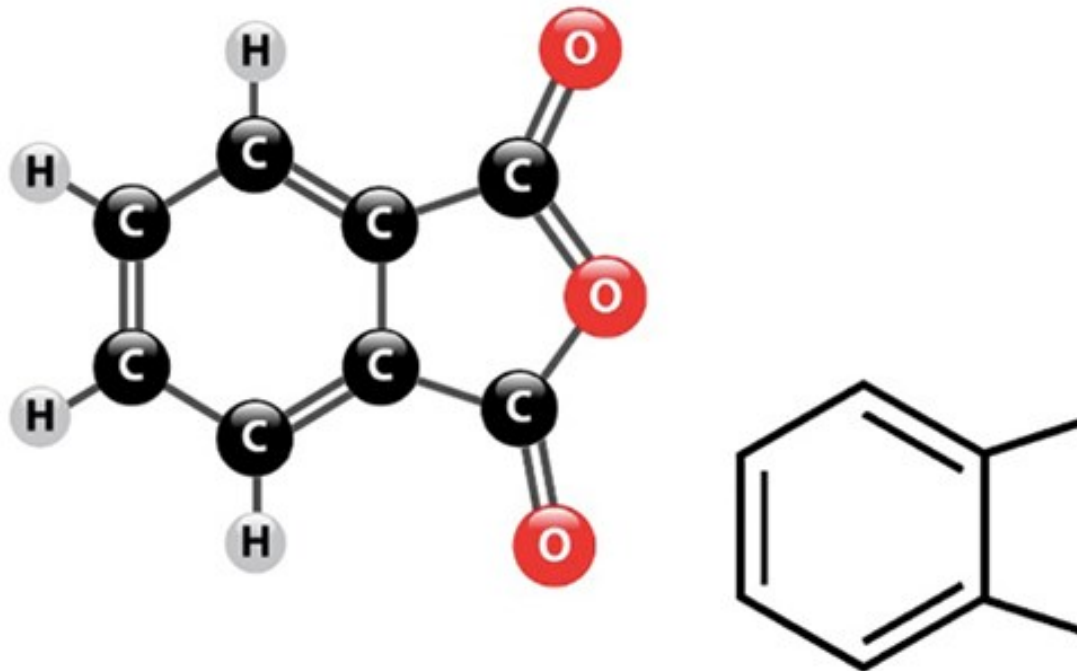
Metodou katalytické hydrogenolýzy se z biomasy získávají stabilní ligninové oleje bohaté na monomery s hydroxylovými skupinami. Takto získané bio oleje jsou ve srovnání s pyrolýzními oleji z biomasy homogennější a obsahují více fenolických sloučenin. Tyto fenolické oleje lze následně využít pro výrobu fenolformaldehydových pryskyřic nebo pro výrobu fenolových pryskyřic na bázi epoxidu. Epoxidové monomery na bázi ligninu lze také mísit v různém poměru s běžnou epoxidovou pryskyřicí. Účelem je snížení obsahu bisfenolu A v epoxidu. I při tomto mísení si pryskyřice zachovává své mechanické a tepelné vlastnosti. Jednou z molekul extrahovaných z ligninové biomasy je vanilin. Vanilin obsahuje jak aldehydové, tak i fenolické hydroxylové skupiny. Aldehydová skupina ve vanilinu může reagovat s aminovou skupinou, což má důležitou roli při zpomalování hoření. Epoxidové pryskyřice na bázi vanilinu tedy vykazují vysokou tepelnou odolnost a vlastnosti zpomalování hoření. Nevýhodou je však nižší teplota počátku tepelného rozkladu. [76; 78]

3.2 Vytvrzovací činidla pro epoxidy na biologické bázi

Epoxidové monomery se v přítomnosti vhodného vytvrzovacího činidla transformují na termosetovou síťovou strukturu. Tato struktura přímo ovlivňuje jejich oblast použití. Běžná vytvrzovací činidla jsou většinou odvozena z petrochemických surovin, které jsou toxické a mohou před vytvrzením způsobit environmentální nebo zdravotní problémy. Z toho důvodu se v poslední době nahrazují vytvrzovacími činidly na biologické bázi. [76]

Pro výrobu vysoce výkonných kompozitů se používají vytvrzovací činidla obsahující aminové skupiny. Největšími zdroji těchto látek jsou biomasa, vanilin nebo sójový olej. Takto vyrobené kompozity se vyznačují vysokou lomovou houževnatostí, vysokou tuhostí a dobrými termomechanickými vlastnostmi. Některé z látek obsahující fosfor (například kardanol) zlepšují zpomalování hoření a mechanickou pevnost, čímž jsou vhodné pro náhradu vytvrzovacích činidel na bázi ropy pro ohnivzdorné nebo korozivzdorné nátěrové aplikace. [76]

V současné době jsou jedněmi z nejdůležitějších komerčních vytvrzovacích činidel ta anhydridová, jako jsou maleinanhydrid a anhydrid kyseliny ftalové. Vytvrzený epoxid pak má nízké smrštění, vysokou teplotu skelného přechodu, nízkou absorpci vody a vynikající elektroizolační vlastnosti. Maleinanhydrid a ftalanhydrid jsou však látky na ropné bázi a vykazují tedy vysokou hořlavost a nejsou dobře recyklovatelné. Náhradou jsou anhydridy na biologické bázi, jako například anhydrid kyseliny jantarové. Pevnost v tahu epoxidové pryskyřice vytvrzené anhydridem kyseliny jantarové je na srovnatelné úrovni s komerčním protějškem. [76]



Obrázek 19 Ftalanhydrid (anhydrid kyseliny ftalové)

(zdroj: [79])

Kromě těchto vytvrzovacích činidel existují i taková, která obsahují více než jednu funkční skupinu. Zástupcem této skupiny je vytvrzovací proces za použití fenolové skupiny z vanilinu na bio bázi a aminová skupina ze sloučeniny na bázi ropy. Takto vytvrzené epoxidové pryskyřice vykazují dobré mechanické vlastnosti a dobrou odolnost vůči rozpouštědlům. Kromě toho jsou dobře zpracovatelné a recyklovatelné. [76]

3.3 Vytvrzování v mírných a ekologických podmínkách

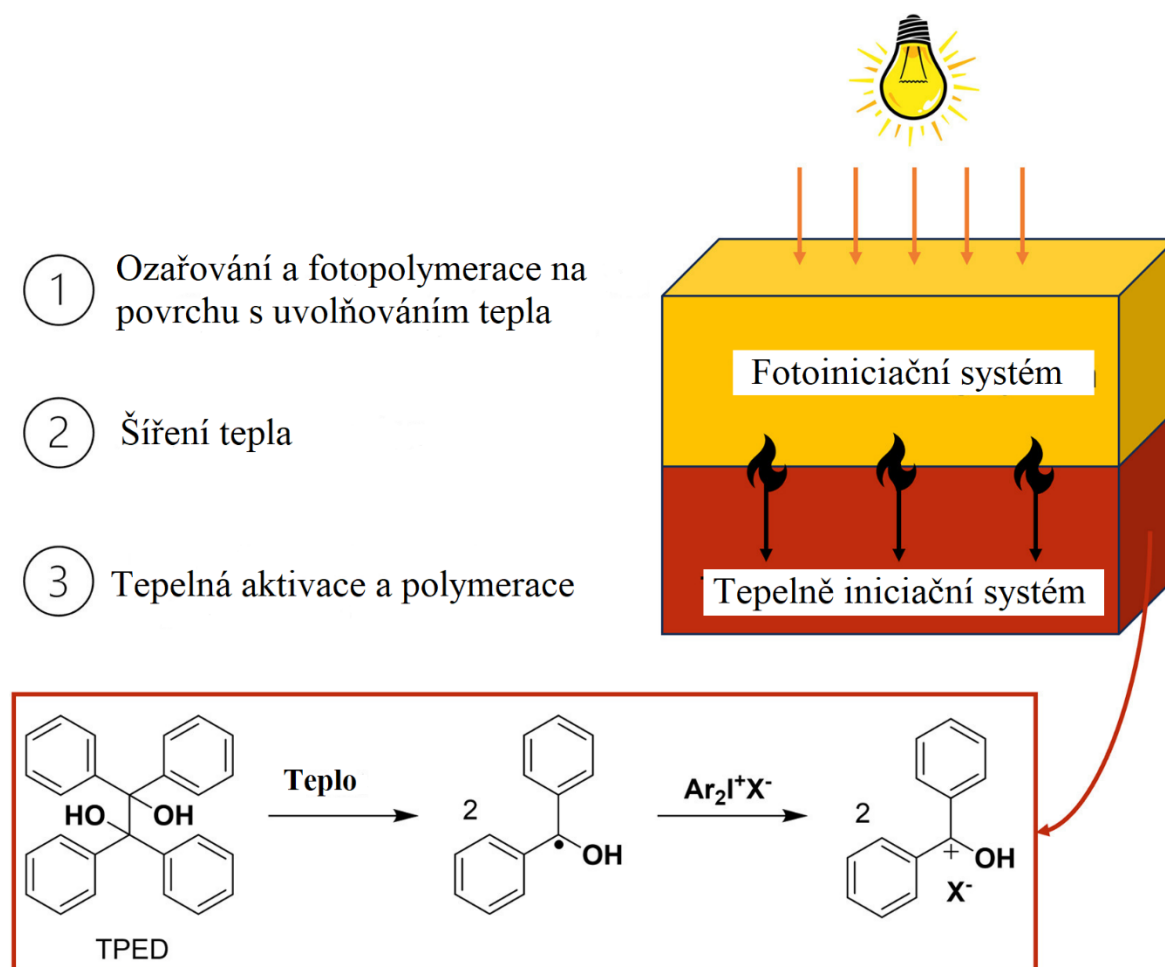
Současné vytvrzovací procesy epoxidových pryskyřic jsou energeticky náročné a vyznačují se vysokými teplotami a dlouhou dobou zpracování. Proto se objevují metody vytvrzování v mírných a ekologických podmínkách, jako je polymerace bez rozpouštědel a při teplotách nepřesahujících 80° C. Cílem je snížení nákladů a dopadů na životní prostředí snížením energetické náročnosti procesu. Tyto vytvrzovací systémy mohou v kombinaci s monomery na biologické bázi vést k náhradě toxického bisfenolu A. Vytvrzování při nízkých teplotách také nabízí malé smrštění a nízké vnitřní napětí. Rozšířené je využití polyadice (stupňovitá polymerace) s aplikací vytvrzovacích činidel na bázi aminů, kyselin, anhydridů či alkoholů (nejčastěji fenolů). Kromě toho však byly vyvinuty i technologie pracující na jiném principu. [77]

3.3.1 Fotopolymerace, frontální polymerace

Jednou z technologií pro vytvrzení za mírných podmínek je fotopolymerace. Jedná se o proces bez použití rozpouštědel, který je energeticky účinný. Systém se skládá z fotoiniciátoru (sulfoniové soli, jodoniové soli, oniové soli) a světelného zdroje (rtuťová výbojka, laser, LED diody). Prostřednictvím absorpce světla fotoiniciátor generuje látky (například kyseliny), které iniciují polymerizaci epoxidové pryskyřice. Tato technologie dobře funguje u epoxidů na ropné bázi a umožňuje vytvrzení během několika sekund či minut. V některých případech lze místo světelného zdroje použít zdroj UV záření. Nevýhodou fotopolymerace jsou stínové zóny, kam neproniká světlo. Tento jev vzniká zejména u materiálů s velkou tloušťkou stěny. Pro odstranění těchto nevýhod byla vyvinuta metoda frontální polymerace. [77]

Metoda frontální polymerace je založena na dvou různých mechanismech síťování – jeden je iniciován světelným zářením a druhý tepelným vytvrzením. Iniciátor je aktivován principem fotopolymerizace a dochází k uvolňování kyselin. Rozklad iniciátoru teplem uvolněným během první fáze pak vede ke tvorbě nových forem kyselin k vytvrzení

epoxidu. Jako fotoiniciátor slouží stejné látky jako u fotopolymerace, jako tepelný iniciátor se používá například 1,1,2,2-tetrafenylethediol (TPED). [77]



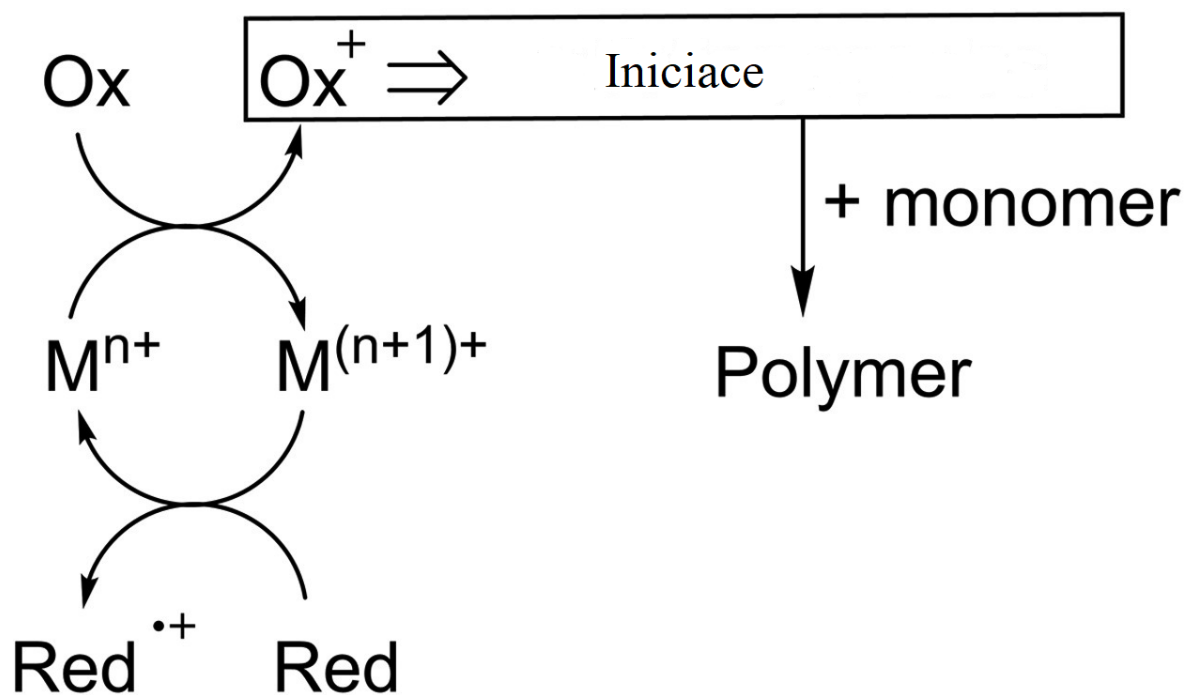
Obrázek 20 Princip frontální polymerace

(zdroj: [77])

3.3.2 Redoxní iniciační systémy

Redoxní iniciační systémy vychází z redoxní reakce mezi dvěma činidly. Jakmile jsou tato činidla smíchána, dochází k uvolňování iniciačních částic, což umožňuje vytvrzení v širokém teplotním rozsahu, aniž by byl nutný další externí zdroj energie. Redoxní činidla mohou být založena jak na organických, tak anorganických sloučeninách (například kovy – měď, stříbro, sodík, draslík atd.). Během procesu dochází k rozkladu solí vlivem katalyzátoru nebo redukčního činidla (například kyselina askorbová, benzoin, cín) za vzniku kyselin. Reaktivita těchto kyselin pak závisí na nukleofilitě aniontu. [77]

Princip redoxního systému na bázi kovu je nastíněn na obrázku 21, kde Ox je oxidační činidlo, Red je redukční činidlo a M je kovový katalyzátor. [77]



Obrázek 21 Redoxní systém na bázi kovu

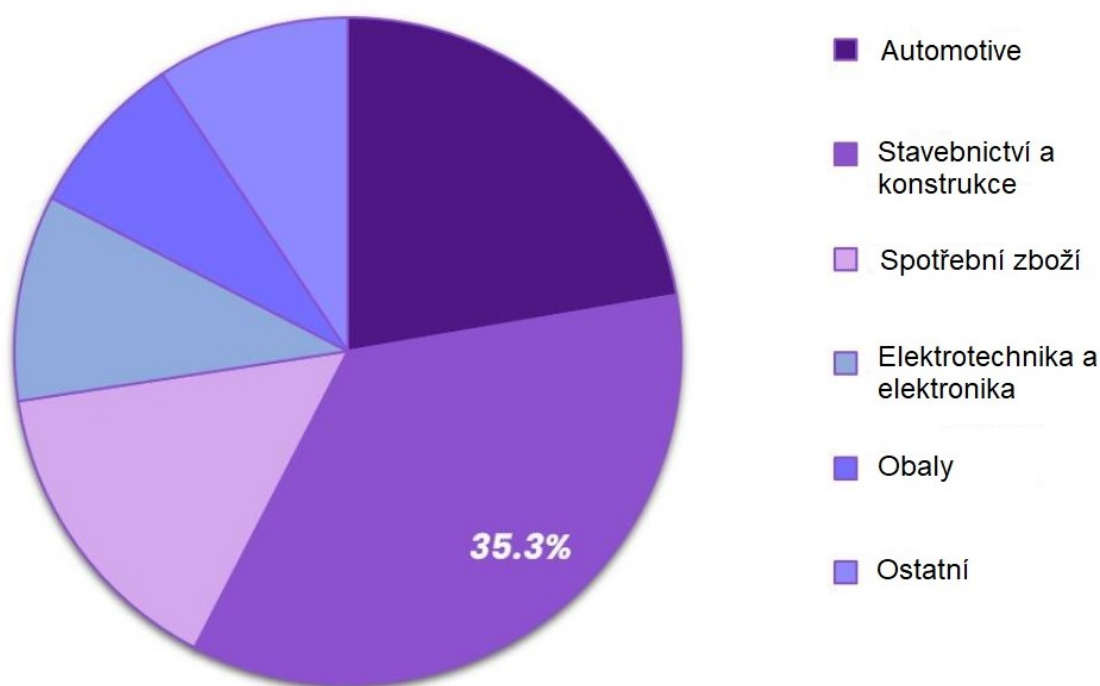
(zdroj: [77])

4 POLYURETAN NA BIOLOGICKÉ BÁZI

Polyuretanové pryskyřice (PUR) představují pro konstrukční kompozity zajímavou alternativu k běžně používaným epoxidovým pryskyřicím, a to zejména díky své vyšší houževnatosti a únavové odolnosti. Polyuretanové matrice se proto v posledních letech čím dál více prosazují v kompozitech pro automobilový průmysl či větrnou energetiku. [39; 40; 41; 44]

Globální trh s bio-polyuretanem

Podíl na trhu v roce 2023 (%)



Obrázek 22 Globální trh s bio-polyuretanem – podíl na trhu v roce 2023 dle oblasti využití

(zdroj: [49])

Hlavním zdrojem polyuretanu, podobně jako i mnoha dalších polymerů, jsou petrochemické látky na bázi ropy. V reakci na celosvětovou poptávku po snižování uhlíkové stopy a nahrazování surovin pocházejících z ropy za udržitelné a ekologicky šetrné probíhá v posledních letech mnoho výzkumů se zaměřením na nahrazení ropy jako zdrojové suroviny. Polyuretany jsou syntetizovány polymeračními reakcemi mezi izokyanáty (-NCO) a polyoly obsahující hydroxylové skupiny. Pro obě složky již dnes existují alternativní zdroje na biologické bázi, zejména z biomasy. [39; 40; 41; 44]

4.1 Polyoly na biologické bázi

Polyoly na biologické bázi lze vyrábět přímo z přirozeně se vyskytujících rostlinných olejů a olejů z řas prostřednictvím různých syntetických mechanismů. Další typy polyolů mohou být syntetizovány z polysacharidů a zdrojů ligninu, například z lignocelulózové biomasy. [47]

4.1.1 Rostlinné oleje a oleje z řas

Syntézy polyolů z rostlinných olejů nebo olejů z řas lze dosáhnout několika různými reakcemi, jako jsou epoxidace, ozonolýza, nebo hydroformylace. Epoxidace se provádí pomocí peroxykyselin. Epoxidovaný olej pak reaguje s alkoholem za vzniku polyolu. Vlastnosti polyolů vyráběných epoxidací závisí na několika proměnných. Rostlinné oleje s vyšším stupněm nenasycení produkují polyoly s aktivnějšími hydroxylovými skupinami, což vede k polyuretanům s vyšší hustotou zesíťování, vyšší teplotou skelného přechodu a vyšší pevností v tahu. [39; 41; 47]

Ozonolýzou rostlinného oleje vznikají polyoly obsahující hydroxylové skupiny, které jsou reaktivnější vůči izokyanátům. Hydroformylace je jednou z nejdůležitějších chemických přeměn rostlinných olejů na polyoly. V tomto procesu se dvojné vazby ve strukturách rostlinných olejů nejprve pomocí katalyzátoru přemění na aldehydy, následně hydrogenací aldehydů vznikají hydroxylové skupiny. Hydroformylované polyoly vykazují vyšší schopnost vytvrzení během reakce s izokyanáty ve srovnání s epoxidovanými polyoly. Polyuretanové pěny s větší tuhostí lze vyrobit z hydroformylovaných polyolů zesíťováním, například pomocí glycerolu. [39; 47]

4.1.2 Lignocelulózová biomasa

Lignocelulózová biomasa, jako je dřevo a zbytky zemědělských plodin, je považována za nejlépe obnovitelnou biomasu na světě. Je také významnou surovinou pro výrobu polyolů na biologické bázi. Hlavními strukturními jednotkami lignocelulózové biomasy jsou celulóza (30 až 35 %), hemicelulóza (15 až 35 %) a lignin (20 až 35 %), což jsou materiály bohaté na hydroxylové skupiny. Materiály z lignocelulózové biomasy jsou však pevného skupenství a před použitím k výrobě polyuretanu je nutné je přeměnit na kapalné polyoly. V současné době existují dvě hlavní technologie pro tuto přeměnu: oxypropylace a zkapalňování. [45]

Oxypropylace biomasy je polymerační proces obvykle prováděn za vysokého tlaku a vysoké teploty (cca 100 až 200 °C) v přítomnosti KOH (hydroxid draselný) jako katalyzátoru. Takto získané polyoly lze použít přímo pro přípravu polyuretanu. [45]

Alternativně může být lignocelulózová biomasa přeměněna na kapalné polyoly procesem atmosférického zkapalňování. Proces zkapalňování se obvykle provádí za zvýšených teplot (150 až 250 °C) za atmosférického tlaku za použití vícesytných alkoholů, jako je polyethylenglykol a glycerol, jako zkapalňovacích rozpouštědel (katalyzátorů). Během procesu zkapalňování je biomasa těmito katalyzátory degradována a rozložena na menší molekuly. Vyrobené polyoly jsou z velké části směsí různých sloučenin bohatých na hydroxylové skupiny a lze je použít přímo k přípravě různých druhů polyuretanu (termoset, lepidla, pryskyřice, pěnový polyuretan a podobně). [45; 48]

Budoucí vývoj získávání polyolů z ligninu představuje metoda využívající enzymů jako biologických katalyzátorů. Enzymy jsou proteiny, které jsou nepostradatelné pro metabolické reakce v živých organismech. Výhodou použití enzymů jako katalyzátorů je specifčnost jejich působení a reakce při teplotách pod 80 °C. Většímu využití enzymů v praxi aktuálně brání nedostatečná probádanost této metody. [48]

4.2 Izokyanáty na biologické bázi

Dnes se k syntéze izokyanátů na biologické bázi používají čtyři druhy biomasy včetně dřeva, zemědělských produktů, pevného odpadu a zdrojů řas. Obnovitelné izokyanáty lze rozdělit do sedmi tříd:

- Polyizokyanáty na bázi ligninu.
- Polyizokyanáty na rostlinné bázi.
- Polyizokyanáty na bázi řas.
- Polyizokyanáty na bázi kešu ořechů.
- Polyizokyanáty na bázi glukózy.
- Polyizokyanáty na bázi aminokyselin.
- Polyizokyanáty na bázi furanu. [47]

4.2.1 Lignin

Ligniny jsou největším přírodním zdrojem aromatických molekul. Díky své zesítné fenolické struktuře se vyznačují vynikajícími vlastnostmi pro chemikálie a polymery. Obecně platí, že k extrakci ligninu z lignocelulózové biomasy je zapotřebí více kroků a dalších chemikálií. Chemické složky získané z ligninu metodami chemické transformace jako jsou uhlíková vlákna, bio olej, syringol, vanilin, kyselina vanilová, kresoly, fenoly atd., jsou nyní považovány za hlavní složky pro výrobu polymerů na biologické bázi. Z vanilinu a kyseliny vanilové byla úspěšně syntetizována řada nových aromatických diizokyanátů na biologické bázi. Tyto syntetizované aromatické diizokyanáty jsou následně polykondenzovány s polyolem na biologické bázi za vzniku obnovitelného termoplastu a termosetového polyuretanu. [47]

4.2.2 Rostlinné oleje a oleje z řas

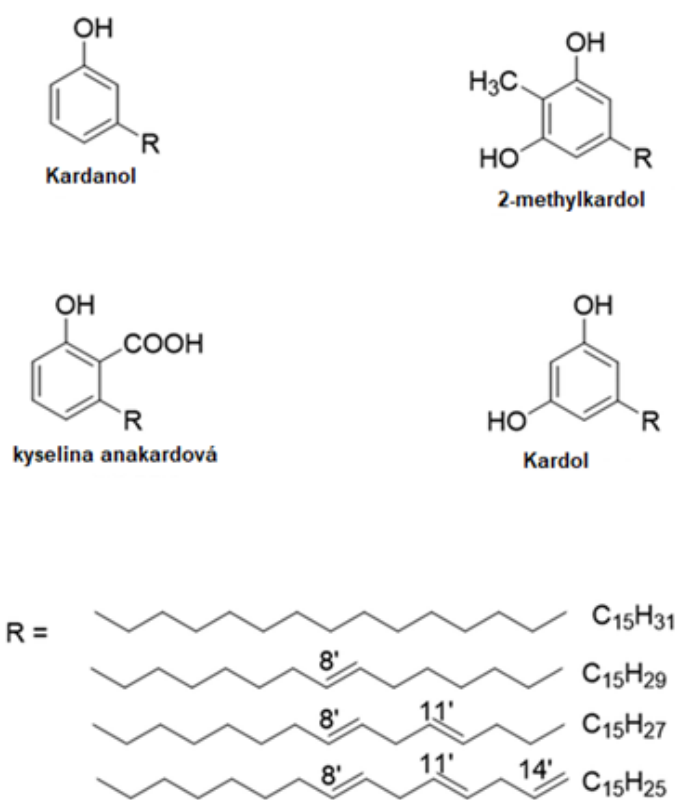
Rostlinné oleje také patří mezi nejslibnější obnovitelné zdroje díky své chemické struktuře s různými aktivními místy, která lze přeměnit na vysoce hodnotné látky pro syntézu polymerů. První diizokyanáty na bázi mastných kyselin, známé jako diizokyanáty kyseliny dimerní, byly objeveny v 70. letech 20. století a komercializovány společnostmi Henkel Corporation a General Mills. Další skupina izokyanátů je syntetizována ze sójového oleje. Rostlinné oleje vykazují nízkou toxicitou, vysokou obnovitelnost a biologickou odbouratelnost. Využívání potravinářských plodin však přináší další problémy, jako je vysoká spotřeba orné půdy, vody a živin. Jsou používány jak pro výrobu biopaliv, tak i výrobu potravin. Izokyanáty na bázi palmového či sójového oleje lze využít pro výrobu bio polyuretanové pěny, která má srovnatelné mechanické vlastnosti s polyuretanovou pěnou vyráběnou konvenčně. [42; 47]

Biomasa řas má rostoucí význam jako budoucí potenciální zdroj pro výrobu udržitelné energie a materiálů. A to díky rychlému tempu růstu, flexibilním preferencím stanovišť a značnému výnosu. Řasy navíc produkují více nenasycených mastných kyselin ve srovnání s běžnými rostlinnými oleji. Řasy lze rychle pěstovat ve velkém měřítku a nemusí spotřebovávat ornou půdu ani sladkou vodu. Mikrořasy lze využít pro syntézu izokyanátů i polyolů. [47]

4.2.3 Skořápky kešu ořechů, cukr

Tekutina ze skořápek kešu ořechů (CNSL, z angl. Cashew Nut Shell Liquid) je tmavě hnědá viskózní kapalina. Hlavními chemickými sloučeninami v CNSL jsou kyselina anakardová, kardanol, kardol a 2-methylkardol. Tyto fenolické sloučeniny mají jedinečnou chemickou strukturu s uhlovodíkovým postranním řetězcem obsahujícím různé stupně nenasycenosti. CNSL je zajímavým obnovitelným výchozím materiálem pro syntézu různých prekurzorů pro syntézu polymerů díky svým charakteristickým strukturním vlastnostem, bohaté dostupnosti a nízkým nákladům. [47]

Přírodní materiály z plodin, jako je škrob, cukr nebo kešu, lze přeměnit na jednoduché vysoce hodnotné prekurzory pro tvorbu polymerů. Ze škrobu nebo glukózy lze získat dianhydrohexitoly, což jsou látky obsahující dvě hydroxylové skupiny, které je možné fosgenací přeměnit na deriváty izokyanátů. Prvním komerčním produktem diizokyanátu na bázi cukru je pentamethylendiizokyanát, který je na trhu pod obchodním názvem Desmodur ECO N7300 od společnosti Covestro. Tento produkt s významným podílem obnovitelných zdrojů (přes 70 %) se vyrábí z biomasy biotechnologickým fosfátováním. [47]

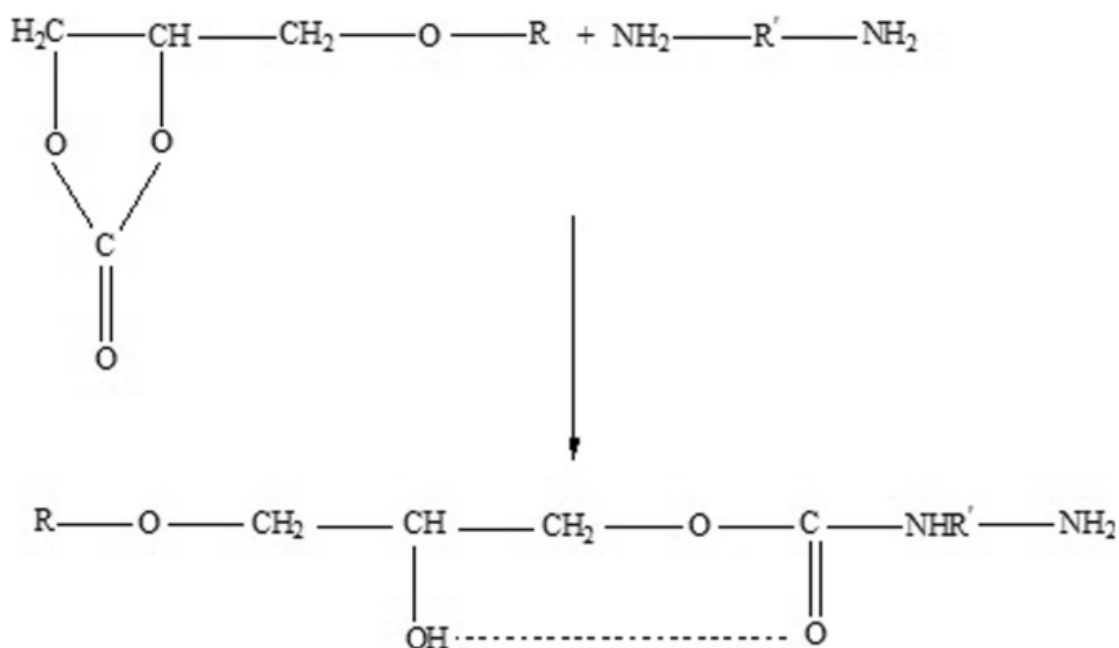


Obrázek 23 Chemická struktura tekutiny ze skořápek kešu ořechů

(zdroj: [43])

4.3 Neizokyanátový polyuretan

Izokyanáty jsou obvykle aromatické, alifatické nebo acyklické látky průmyslově vyráběné z fosgenu. Vzhledem k toxicitě fosgenu si v chemickém průmyslu v poslední době získává stále větší pozornost syntéza neizokyanátového polyuretanu (NIPU). NIPU je založen na reakci polycyklouhličitanů a polyaminů. Výsledný materiál se nazývá polyhydroxyuretan (PHU). Je tomu proto, že obsahuje hydroxylové skupiny v celém makromolekulárním řetězci. Tyto hydroxylové skupiny vytváří vodíkové vazby, proto materiál vykazuje vyšší chemickou a fyzikální odolnost a pevnost. Polycyklouhličitanů jsou nejběžněji získávány reakcí oxidu uhličitého s cyklickým etherem (například epoxidem) za přítomnosti katalyzátoru. Přestože je příprava polyuretanu bez izokyanátů žádoucí z hlediska ochrany životního prostředí, technologie je zatím stále nákladná a vyžaduje další vývoj. [39; 46; 47]



Obrázek 24 Tvorba polyhydroxyuretanu reakcí mezi cyklouhličitanem a aminem

(zdroj: [39])

5 PŘÍRODNÍ VÝZTUŽNÉ MATERIÁLY

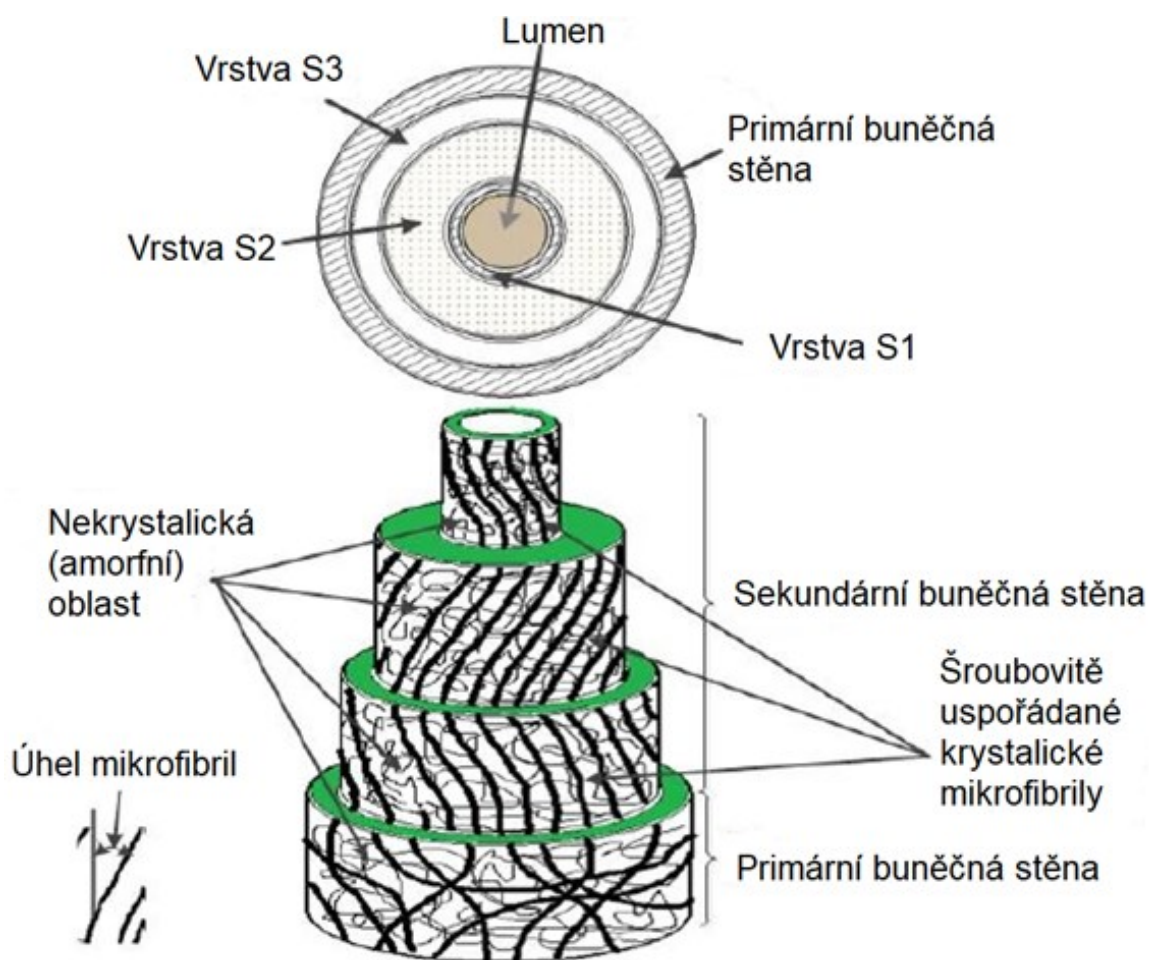
Výztužné materiály mohou zlepšit vlastnosti polymeru či kompozitu. Jedná se zpravidla o tepelnou stabilitu, mechanické vlastnosti (tah, houževnatost, ohyb) a další funkční vlastnosti. Výztužné materiály lze rozdělit do dvou skupin dle jejich původu – anorganické a syntetické. Mezi anorganické se řadí skelná vlákna, oxidy kovů (zinek, hliník a hořčík), oxid křemičitý, nitridy uhlíku a boru, grafit, uhlíkové nanotrubičky, mastek, slída, kaolin nebo živec. Mezi syntetické patří materiály jako aramid, uhlík, polyestery a polyvinylalkohol. [40]

V reakci na celosvětovou poptávku po snižování uhlíkové stopy a nahrazování surovin pocházejících z ropy se při výrobě kompozitů dostává velké pozornosti navrhování ekologických a udržitelných kompozitních materiálů z přírodních zdrojů. V procesu inovativních metod a vývoje materiálů se přírodní vlákna ukázala jako slibné alternativy k syntetickým vláknům. Vlastnosti přírodních vláken, jako je hojná dostupnost, nízká hustota, nízké výrobní náklady, vysoký poměr stran (tj. poměr mezi délkou a průměrem průřezu), flexibilita zpracování, nízký oděr, nízká toxicita, biologická rozložitelnost, odolnost proti korozi, recyklovatelnost, vysoká absorpce nárazů a přizpůsobitelné vlastnosti, z nich učinily potenciální kandidáty k náhradě syntetických vláken při výrobě kompozitních materiálů. Přírodní vlákna jsou rozdělena do tří hlavních kategorií na základě jejich původu – rostlinná vlákna, živočišná vlákna a minerální vlákna. [40]

Navzdory několika potenciálním výhodám mají kompozity vyztužené přírodními vlákny stále omezení ve srovnání s kompozity ze syntetických vláken. Vlastnosti přírodních vláken, jako je poměr stran a kompatibilita s polymerní matricí, hrají zásadní roli pro vlastnosti kompozitního materiálu. Vysoký poměr stran vláken je důležitý pro odolnost a přenos vysokého zatížení v rámci kompozitu. Vlákná s vysokým poměrem stran mohou vést ke vzniku kompozitů s vynikajícím Youngovým modulem a tuhostí. Přírodní vlákna jsou hydrofilní a absorbují obrovské množství vlhkosti. Většina polymerních matric je však hydrofobní a odpuzuje hydrofilní vlákna. Docílení vhodné kompatibility nebo mezifázové adheze je proto u kompozitů z přírodních vláken obtížné. Fyzikální, mechanické a tepelné vlastnosti kompozitů však závisí právě na mezifázové adhezi vláken s polymerní matricí. Nižší povrchová energie a vyšší polarita vláknitého materiálu mohou zajistit lepší přilnavost. Jednou z cest pro zvýšení pevnosti mezifázového spoje je proto modifikace vláken. Tento proces také odstraňuje hydrofilní hydroxylové skupiny z povrchu vláken a činí je kompatibilnějšími s polymerní matricí. [40]

5.1 Rostlinná vlákna

Rostlinná vlákna lze získat téměř ze všech částí rostlin, jako je stonek, list a semena. Mohou být získávána také ze sekundárních zdrojů, jako jsou rýžové slupky, slupky slunečnicových semen a bagasa (rozvlákněná stébla) cukrové třtiny ze zpracovatelských závodů. Mezi nejběžnější rostlinná vlákna patří bavlněné vlákno. Rostlinná vlákna obsahují vnitřní dutou část známou jako lumen. Tato prázdná trubkovitá struktura snižuje objemovou hmotnost vlákna a poskytuje vláknu dobré akustické izolační vlastnosti. Hlavními nevýhodami rostlinných vláken jsou hořlavost, nízká tepelná odolnost, hydrofilnost a nízká trvanlivost ve srovnání s kompozity ze syntetických vláken. [40]



Obrázek 25 Struktura rostlinného vlákna

(zdroj: [40])

5.1.1 Bavlněná vlákna

Bavlna je nejrozšířenějším tradičním textilním vláknem. Jedná se o vlákno ze semen bavlníku z čeledi Malvaceae. Bavlna obsahuje velmi vysoké množství celulózy, více než 90 %. Stupeň polymerace závisí na původu surových bavlněných vláken a procesu zpracování. Hydroxylové skupiny na celulóze se snadno zapojují do mezimolekulárních vodíkových vazeb a tvoří uspořádané krystalické uspořádání. Díky vysoké krystalinitě mají bavlněná vlákna vysoký modul pružnosti v tahu a výborné mechanické vlastnosti. Bavlněná vlákna jsou odolná vůči alkalickým roztokům a jejich mechanické vlastnosti jsou dobré i po absorpci vody. Kyselina však může narušit strukturu vláken. Proto je absorpce vody velmi vysoká a houževnatost se po absorpci vody zvyšuje. Bavlněná vlákna se používají k výrobě luxusních papírů a jsou široce používány v textilním průmyslu. [40; 62; 63]

5.1.2 Jutové vlákno

Jutové vlákno je, spolu s bavlněným, jedním z nejdůležitějších textilních vláken. Juta je tropická rostlina z čeledi Tiliaceae pěstovaná zejména v Indii, Číně a Bangladéši. Juta je jednou z ekologicky nejšetrnějších rostlin, která může absorbovat 60 tun oxidu uhličitého a vypustit 10 tun kyslíku během 120 dnů života. Jutová vlákna se získávají ze stonku této rostliny. Obsahuje 60 až 73 % celulózy, 13,6 až 23 % hemicelulózy a 12 až 16 % ligninu. Průměrná délka vlákna je 2 mm s průměrným průměrem 20 µm, úhel mikrofibrily je 8 stupňů. Mechanické vlastnosti, jako je modul pružnosti v tahu a flexibilita, závisí na krystalické oblasti a příčných vazbách mezi tvrdými nekystalickými amorfními oblastmi. Modul pružnosti v tahu se pohybuje mezi 393 a 770 MPa. Reaktivita vůči kyselinám, zásadám a dalším oxidačním činidlům je velmi vysoká díky vysokému obsahu ligninu a hemicelulózy. Degradace vláken způsobená světlem je vyšší než u jiných vláken. Jutové vlákno se používá jako výztuž v kompozitech a má i další různé aplikace, jako jsou obaly, lana, příze a nástěnné dekorace. Kromě toho se využívá také k výrobě nábytku, vodovodních trubek a v automobilovém průmyslu. [40; 62; 63]

5.1.3 Sisalová vlákna

Sisalové vlákno je vlákno extrahované z listů rostliny Agave sisalana, která se objevila v Mexiku. Pěstování této rostliny je soustředěno hlavně v Brazílii, Jižní Africe a Západní Indii. Sisal obsahuje asi 65 až 78 % celulózy, 10 až 22 % hemicelulózy, 8 až 11 % ligninu a 10 % pektinu. Běžné sisalové vlákno je dlouhé od 1 do 1,5 m a má průměr 100 až 300 µm. Extrakce vláken je jednoduchý proces díky nedostatku tuhých vnějších částí, a provádí se

nejčastěji pomocí dekortikace. Chemické a fyzikální vlastnosti vláken závisí na klimatu a podmínkách pěstování zdrojové rostliny. Modul pružnosti v tahu se pohybuje mezi 400 a 700 MPa, vlákno má vynikající tepelnou odolnost až do 200 °C. Nejdůležitější vlastností sisalového vlákna je však jeho rázová houževnatost. Rázová houževnatost závisí na mikrofibrilárním úhlu celulóзовých uspořádání. Optimální hodnota pro vysokou rázovou houževnatost se pohybuje mezi 15 a 20 stupni a pro Sisal je 21. Sisalové vlákno má specifickou pevnost a tuhost srovnatelnou se skelným vláknem. Morfologické studie pomocí SEM (skenovací elektronový mikroskop) ukazují, že sisalové vlákno je vhodné pro adsorpci chemických látek díky svým vysoce porézním a drsným mikrostrukturám, které obsahují dutiny a trhliny. Kromě toho funkční skupiny (například karboxyl, fenol a amid) zajišťují zadržování kovových iontů. Sisalová vlákna se používají k výrobě rohoží, motouzů, lan a dalších produktů, které se běžně používají v námořním a zemědělském průmyslu. Používají se také k vyztužení cementových matric ve stavebnictví, v automobilovém průmyslu a při výrobě nábytku [40; 62; 63]



Obrázek 26 a) rostlina Agave sisalana, b) sisalová vlákna

(zdroj: [40])

5.1.4 Lněná vlákna

Len, známý jako *Linum Usitatissimum*, je jednoletá rostlina, jejíž stonky a semena se používají k výrobě vláken. Rostlina může dorůst do výšky 0,6 až 1,2 m, s průměrem stonku v rozmezí od 1 do 3 mm. Lněné vlákno je vysoce ceněno také díky své vynikající kvalitě a výtěžnosti ve srovnání s jinými dostupnými vlákny. Len se pěstuje především v mírných oblastech, jako je Středomoří, Kanada a indický subkontinent. Len obsahuje vysoké množství celulózy v rozmezí od 60 do 81 %, což přispívá k výborným mechanickým vlastnostem. Modul pružnosti v tahu se pohybuje v rozmezí od 500 do 900 MPa, mez pevnosti v tahu a tlaku je

1 200 MPa. Vzhledem k těmto parametrům může lněné vlákno nahradit vlákna skelná. Lněné vlákno se dále vyznačuje vysokou houževnatostí a nízkou hustotou. Běžně se používá v oděvech, kompozitech a cigaretových papírcích. Kromě toho se lněná vlákna používají také v automobilovém průmyslu k vyztužení, konkrétně při výrobě a vývoji skrytých interiérových dílů, jako jsou dveřní panely, skořepiny zadních sedadel, palubní desky apod. [40; 63]

5.1.5 Konopná vlákna

Konopí je jednoletá rostlina patřící do kategorie lýkových vláken. Konopné vlákno je považováno za jedno z nejstarších přírodních vláken, pěstuje se již více než 12 000 let a vyznačuje se svou šetrností k životnímu prostředí. Konopné vlákno je odolnější než ostatní přírodní vlákna. Má vynikající odolnost vůči zásadám a organickým rozpouštědlům s tepelnou odolností až do 160 °C. Obsahuje více celulózy (55 až 72 %) a méně ligninu (2 až 5 %) než jiná vlákna, což přispívá k dobrým mechanickým vlastnostem a odolnosti proti vodě. Modul pružnosti v tahu se u konopných vláken pohybuje mezi 600 až 900 MPa. Jeho hodnota je závislá na délce a průměru vlákna podle podmínek pěstování. To je hlavní nevýhoda konopného vlákna ve srovnání s ostatními. Díky své vysoké pevnosti se uplatňuje zejména v textilním a papírenském průmyslu, dále také k výrobě lan a plachet. [40; 63]



Obrázek 27 Konopné lano

(zdroj: [64])

5.2 Živočišná vlákna

Na rozdíl od rostlinných vláken se vlákna živočišná skládají z bílkovin, nejčastěji ze dvou zdrojů – srsti (keratin) a tělesných sekretů (fibroinů) hmyzu. Keratin je složitá molekula se šroubovicovými strukturami v molekulách s dlouhým řetězcem. Fibroin je méně složitá molekula obsahující omezené množství komplexních aminokyselin. Keratinové polymerní řetězce jsou zesíťovány disulfidovými vazbami. Mechanické vlastnosti živočišných vláken jsou lepší než vláken rostlinných, ale díky nízkým nákladům na pěstování jsou rostlinná vlákna ekonomicky výhodnější. [40]

5.2.1 Hedvábí

Hedvábné vlákno je nejatraktivnějším textilním vláknem. V současné době se pro hlavní aplikace používají dva druhy hedvábných vláken, tj. hedvábné vlákno produkované mřou Bombyx mori a hedvábí Tasar produkované bourcem morušovým. Skládaná krystalická struktura hedvábného vlákna poskytuje vlákně větší odolnost. Hedvábné vlákno obsahuje přibližně 75 % vlákniny, což je více než u všech živočišných vláken, a zbytek tvoří sericinový protein. Díky hydrofilním skupinám aminovodíkových a karboxylových skupin na aminokyselinách, stejně jako četným pórům uvnitř, vykazuje hedvábné vlákno silnou adsorpční schopnost. Hedvábné vlákno má dobrou taktnost, lesk, měkkost a savost. Nevýhodou je však vyšší cena. S výjimkou textilií je tak méně často využíváno pro průmyslové aplikace. Hedvábí je však jedním z mála vláken živočišného původu, která lze uměle replikovat. Proces výroby umělého hedvábí zahrnuje použití proteinů nacházejících se v přírodních hedvábných vláknech, obvykle odvozených z kokonů bource morušového. Tyto proteiny se poté rozpustí a zpracují za vzniku roztoku, který lze vytlačit jemnými tryskami za vzniku vláken. Tento proces napodobuje přirozený proces spřádání bource morušového. Umělé hedvábí, často označované jako "syntetické hedvábí", může mít vlastnosti jako přírodní hedvábí – hladká textura, lesk a pevnost. Kromě toho může být umělé hedvábí navrženo tak, aby mělo specifické vlastnosti přizpůsobené různým aplikacím, což z něj činí všestranný materiál. [40; 62; 66]



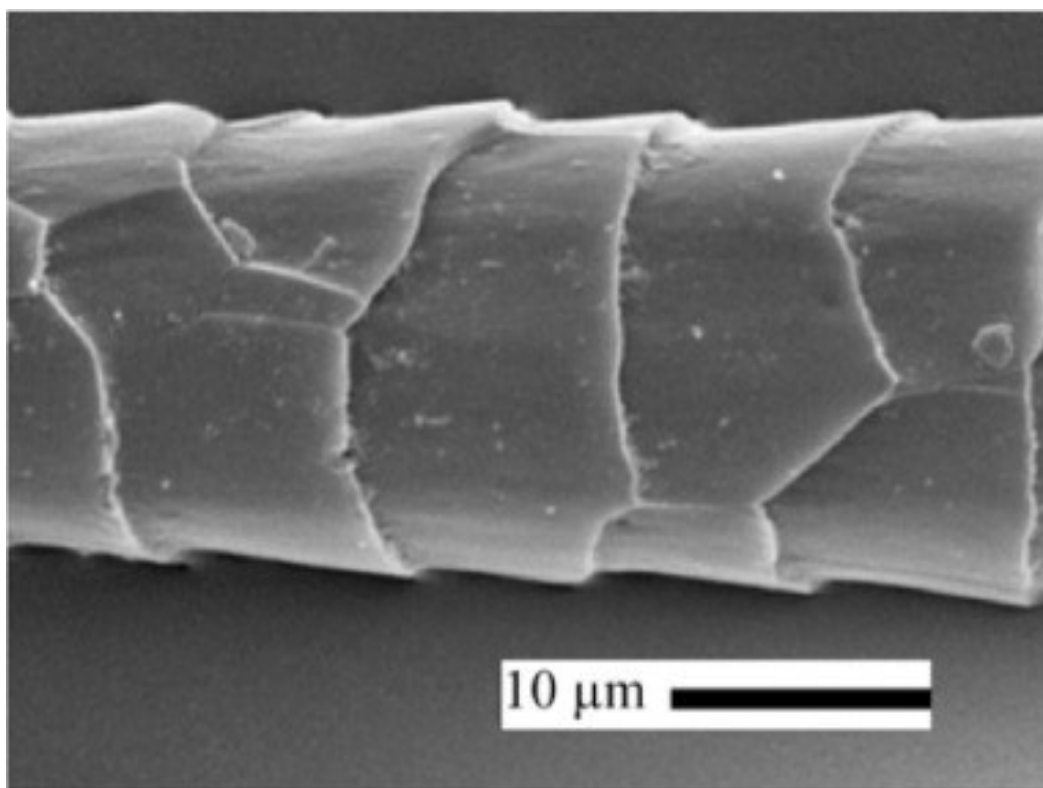
Obrázek 28 Snímek hedvábného vlákna ze SEM

(zdroj: [69])

5.2.2 Vlněná vlákna

Vlna je všestranné živočišné vlákno tvořené α keratinem složeným z 18 aminokyselin. Chemické složení se liší podle zdrojového zvířete. Vlněná vlákna pocházejí z ovčí, králíků, velbloudů a koz. Vlněné vlákno obsahuje zhruba 17 % dusíku, 3,2 až 3,7 % síry a velmi nízké množství vápníku, fosforu a sodíku. Vrstva mastných kyselin na povrchu vlněného vlákna přispívá k jeho povrchové hydrofobnosti. Mikrostruktura vlněného vlákna vykazuje přirozené zvlnění a obsahuje šupiny pokrývající jeho podélný povrch. Vlněné vlákno je navíc měkké a elastické s nízkou pevností ve srovnání s jinými vlákny (pevnost v tahu 120 až 180 MPa, modul pružnosti 2,3 až 3,4 GPa, tažnost 25 až 35 %). Vlna se využívá zejména v textilním průmyslu. Díky svým jedinečným vlastnostem, jako je tepelná odolnost, odolnost proti vlhkosti a přirozená retardace hoření (nejvyšší ze všech přírodních vláken), je však ideální také pro různé aplikace v izolačním průmyslu. Vlnu lze efektivně použít jako foukanou izolaci pro stěny a podkroví, izolační materiál v latích a rolích pro pohodlnou instalaci, a dokonce i jako sypký materiál pro těžko přístupná místa. Vlnu lze využít i pro

střešní systémy nebo i akustická řešení díky svým vlastnostem pohlcujícím zvuk. [40; 62; 65; 66]



Obrázek 29 Struktura vlněných vláken

(zdroj: [66])

5.2.3 Péřová vlákna

Peří může být použito jako náhrada surovin nešetrných k životnímu prostředí pro několik strojírenských aplikací. Jeho vlákna jsou složena z keratinu (druhý nejhojněji zastoupený biopolymer po kolagenu), který je bohatý na hydrofobní zbytky s pevností blízkou nylonu. Drůbeží peří se dělí na dva hlavní typy: letkové peří pokrývající vnější povrch těla a prachové peří pod nimi. Vlákně peří z letky je duté, zatímco vlákno prachového peří je pevné, avšak nadýchané a křehké. Kompozity na bázi polymerů vyztužené vlákny z kuřecího peří mají zvýšenou odolnost proti mechanickému namáhání (55 MPa) a relativně vysoký modul pružnosti (4,2 GPa) díky zesíťované struktuře plniv a semikrystalické charakteristice vlákna. Kromě toho jsou tato vlákna snadno dostupná, levná, biologicky odbouratelná, pružná a lehká ve srovnání se syntetickými a některými jinými výztužnými materiály. Hustota kuřecího peří je přibližně 0,8 g/cm³ zatímco celulóзовých a vlněných vlákna přibližně 1,5 g/cm³, resp. a 1,3 g/cm³. Peří se vyznačuje také dobrými akustickými a tepelnými vlastnostmi. [62; 66]

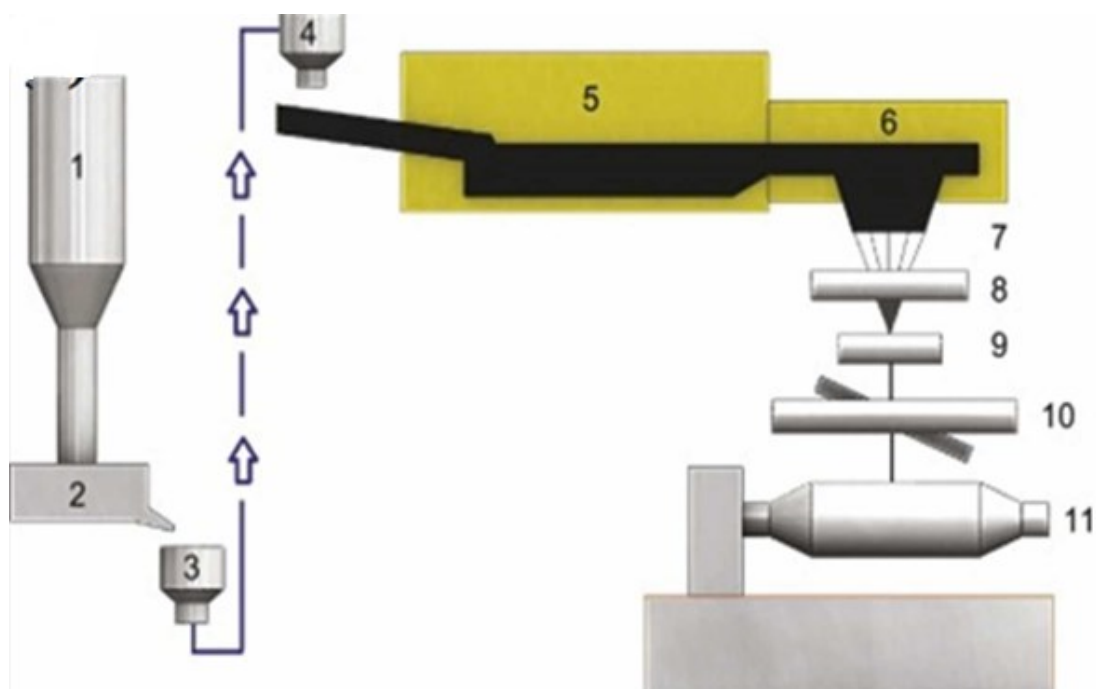
5.3 Minerální vlákna

Anorganická přírodní vlákna neboli minerální vlákna se vyskytují přirozeně. Po rostlinných vláknech jsou druhým nejhojněji zastoupeným přírodním vláknem. Lze je rozdělit na přírodní a umělá. Mezi přírodní patří například azbestová nebo kovová vlákna (například hliníková). Minerální vlna, skelná vlna nebo keramická vlákna jsou hlavními syntetickými minerálními vlákny. Minerální vlna je sloučenina oxidů vápníku nebo hořčíku. Azbest je starobylý vláknitý materiál, který se vyskytuje ve dvou formách hadovitého a amfibolového azbestu. Tato vlákna jsou velmi odolná a nacházejí se v mnoha aplikacích civilní infrastruktury, přestože mají neblahý dopad na lidské zdraví. [40]

5.3.1 Čedičová vlákna

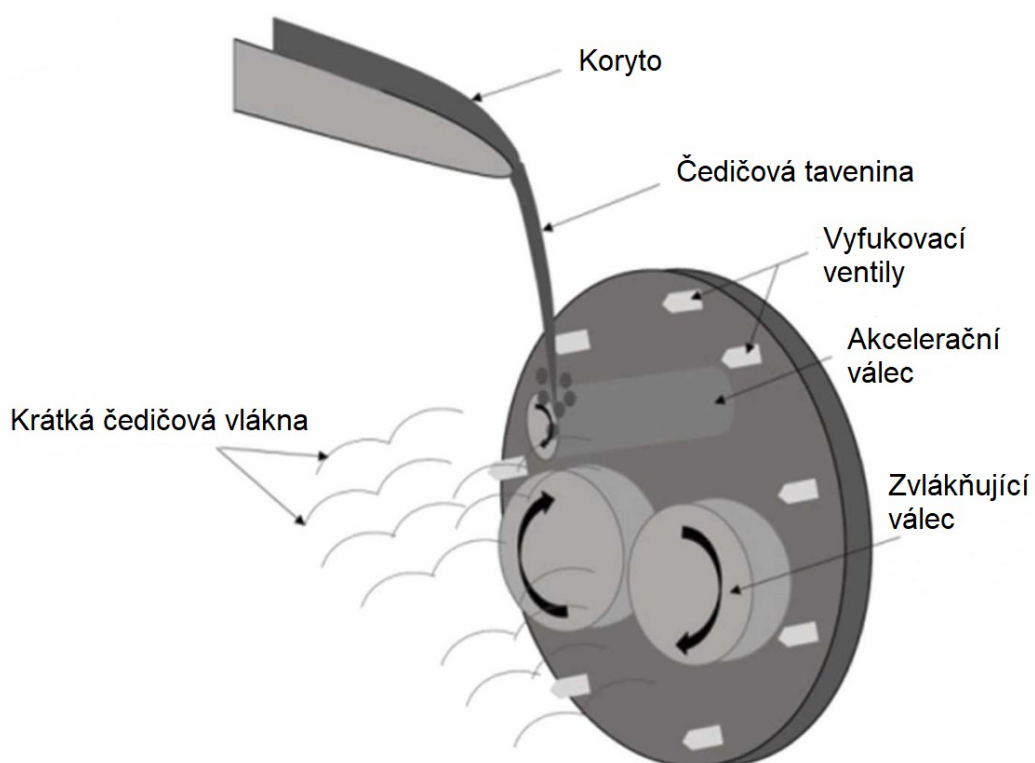
Čedič, skládající se z křemíku (Si), hořčíku (Mg), sodíku (Na), oxidu hlinitého (Al_2O_3), draslíku (K) a železa (Fe), patří mezi celosvětově hojně rozšířené horniny. Různé druhy čediče se běžně využívají ve stavebnictví, například při výrobě dlaždic nebo po rozdrčení jako příměs betonových směsí. Aplikace čediče jako výztuž polymerů a betonových konstrukcí výrazně snižuje emisi CO_2 a pomáhá, do určité míry, minimalizovat znečištění způsobené výrobou různých polymerů a sklolaminátových materiálů. Vliv technologických procesů spojených s výrobou a využitím čedičových vláken na životní prostředí je ve srovnání s uhlíkovými či skelnými vlákny výrazně nižší. Čedičová vlákna (BF, z angl. Basalt Fibres) se vyznačují dobrými mechanickými a tepelnými vlastnostmi a chemickou stabilitou. [61]

Pro výrobu čedičových vláken se nejčastěji používají dvě technologie – zvlákňování a technologie Junkers. Technologie zvlákňování se používá zejména pro výrobu nekonečných vláken. Drcená čedičová hornina se zahřívá na teplotu mezi 1 350 °C až 1 420 °C v rhodiovo-platinové nádobě. Po zahřátí je protlačována zvlákňovací tryskou s malým otvorem ve dnu. Vyrobené svazky vláken jsou následně navíjeny na cívky. Schématicky je tato technologie nastíněna na obrázku 30, kde (1) znázorňuje segmenty drcené horniny, (2) zásobní komoru, (3) dopravní sekci, (4) dávkovací šterbinu, (5) primární topnou zónu, (6) sekundární topnou zónu s monitorováním teploty, (7) trysky, (8) aplikátor pro dimenzování, (9) zvlákňování, (10) napínání vláken a (11) navíjení vláken. [61]



Obrázek 30 Technologie zvlákňovací trysky

(zdroj: [61])



Obrázek 31 Technologie Junkers

(zdroj: [61])

Technologie Junkers spočívá v lití roztaveného čediče do rotačního válce s horním plněním (akcelerační válec), a následného přenosu na oba spodní fibrilační hřídele (zvlákňující válce). Roztavený čedič se díky silným odstředivým silám rozděluje na drobné kapky. Ty se následně vlivem přiváděného stlačeného vzduchu na zadní stranu fibrilačních hřídelí mění na tenké válečky, a po ochlazení vytvoří krátká čedičová vlákna. [61]

Uhlíková vlákna jsou dražší než vlákna skelná. Z hlediska ceny jsou skelná a čedičová vlákna podobná. Čedičová vlákna však ta skelná překonávají v pevnosti. Proto lze u některých aplikací v kompozitních materiálech využívat právě čedičová vlákna. Ta mají také vynikající vlastnosti z hlediska akustické a tepelné izolace, nehořlavosti a biologické stability. Čedičová vlákna jsou využívána ve vysokoteplotních aplikacích díky své schopnosti odolávat vyšším teplotám než vlákna skelná. [61]

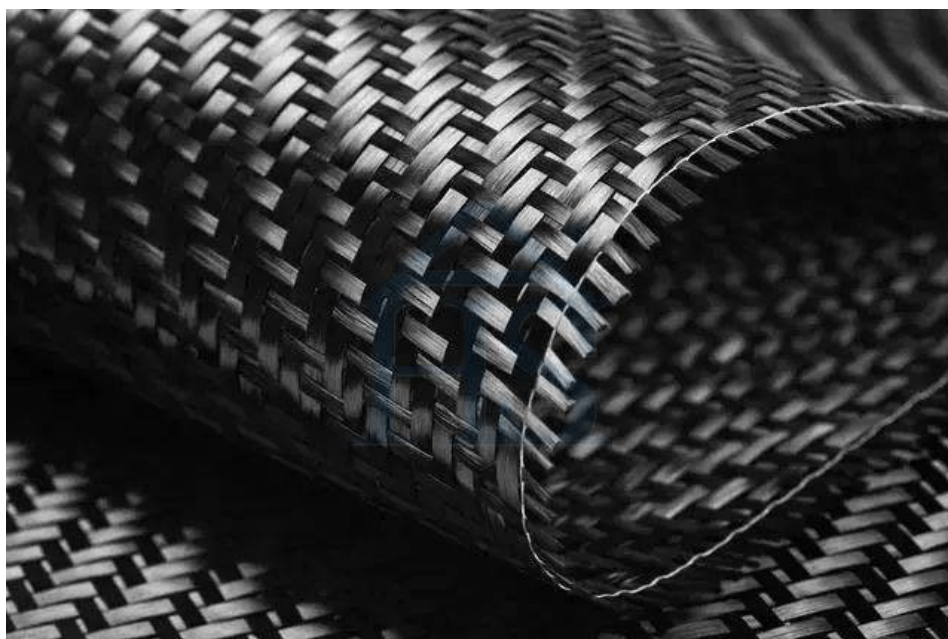
5.3.2 Vlákna z karbidu křemíku

Karbid křemíku (SiC) je materiál, který může nahradit vysokoteplotní superslitiny nebo oceli pro aplikace, které vyžadují vysokou pevnost, vysoký bod tání, odolnost proti oxidaci a nízkou hmotnost. Při použití ve formě kompozitů vyztužených vlákny SiC, může být aplikován pro konstrukční řešení pro vysoké pracovní teploty nad 1 000 °C, které jsou výrazně nad současnými možnostmi běžných konstrukčních slitin. Nejběžnějším způsobem, jak vyrobit vlákno SiC, je použít polymerní prekurzor, protože zvlákňování poskytuje lepší kontrolu průměru vlákna ve srovnání s jinými metodami. Vlákna s malým průměrem, která lze vyrobit cestou polymerního prekurzoru, jsou žádoucí, protože tomuto materiálu s vysokým modulem pružnosti dodávají flexibilitu, která umožní tkaní, splétání a pletení pro přípravu předlisků. Peletizovaný materiál je ve vytlačovacím šneku roztaven a protlačen zvlákňovací hlavou. Vytvořená prekurzorová vlákna jsou navinuta na cívku, a následně použita pro výrobu vláken SiC. Před tím je však třeba prekurzorová vlákna stabilizovat. Hlavním účelem stabilizace je přeměnit strukturu polymeru na netavitelný polymer zesíťováním. Kromě oxidačních metod zesíťování se v dnešní době čím dál častěji využívá metod neoxidačních, jako je e-paprsek s inertním plynem nebo gama paprsky v inertním prostředí. Tyto metody výrazně zlepšily vlastnosti vláken. [67]

Dalšími možnými technologiemi k výrobě SiC vláken jsou chemická depozice z plynné fáze (CVD) nebo chemická infiltrace par (CVI). Technologie CVD SiC vláken vyžaduje, aby vrstva karbidu křemíku byla nanášena na kontinuální jádro, což je buď uhlíkové nebo wolframové vlákno. CVD SiC vlákna jsou křehká a mají větší průměr (mezi

70 až 150 μm) než vlákna vyráběna z prekurzorů (mezi 10 až 15 μm). Větší průměr vláken CVD SiC je také jednou z jejich největších nevýhod, protože vlákna s větším průměrem se nehodí pro tkaní a výrobu předlisků složitých tvarových předmětů. Jedna z nových CVD metod, která je však stále ve fázi vývoje procesu, se nazývá rychlá laserem podporovaná chemická depozice z plynné fáze (R-LCVD). Tato metoda výroby vláken SiC zahrnuje laserové zahřívání a nanášení přímo z plynných sloučenin. Tato technologie slibuje vyšší čistotu SiC vláken.

Jednou z důležitých aplikací vláken SiC je v pozemních plynových turbínách pro výrobu elektrické energie. Pokud by bylo možné zvýšit pracovní teploty turbín, zvýšila by se i jejich účinnost. Zvýšení pracovní teploty je možné pouze při použití vláken SiC a kompozitů z nich, protože kovy nebo superslitiny nemohou tyto teplotní požadavky splnit kvůli svému teplotnímu omezení. Potenciální zvýšení energetické účinnosti leteckých proudových turbín o 15 až 20 % by se výrazně promítlo do dopadu na životní prostředí a snížení nákladů. Zvýšením energetické účinnosti proudových turbínových motorů o 15 % by ušetřilo přibližně 122 milionů tun emisí CO_2 . Společnost General Electric (GE) začala používat vláknové kompozity s karbidem křemíku (CMC) ve svých nejnovějších proudových motorech a plánuje jimi nahradit i další části motorů. Další důležitou oblastí aplikace vláken s karbidem křemíku je v reaktorech vyrábějících jadernou elektrickou energii, kde se využívají jako obložení palivových tyčí. [67]

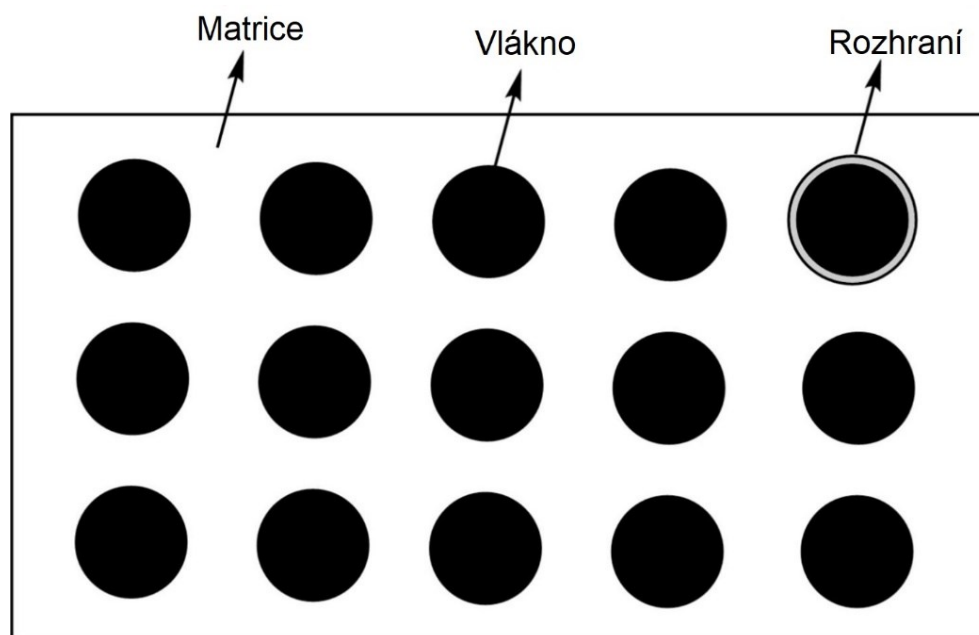


Obrázek 32 Tkanina z vláken karbidu křemíku

(zdroj: [68])

6 MODIFIKACE VLÁKEN A MATRICE

Přechodová oblast mezi vlákny výztuže a matricí se nazývá rozhraní. Rozhraní hraje důležitou roli pro přenos zatížení z matrice na vlákna. Mikrostruktura a vlastnosti rozhraní určují trvanlivost, fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti kompozitů. V rozhraní dochází ke koncentraci vnějšího napětí, proto zde často dochází ke tvorbě mikrotrhlin. To má za následek šíření trhlin snižující únosnost kompozitu. Rozhraní mezi vláknem a matricí je tvořeno různými fyzikálními a chemickými interakcemi, jako jsou chemické reakce a vazby, mezimolekulární interakce, molekulární provázanost, elektrostatická přitažlivost, fyzikální přitažlivost, vodíkové vazby, van der Waalsovy síly apod. Vlivem okolního prostředí na kompozit dochází také k degradaci těchto rozhraní, což má negativní vliv na mechanické vlastnosti a únosnost materiálu. Modifikacemi fyzikálních nebo chemických interakcí vláken či matrice dochází k ochraně rozhraní před těmito degradačními vlivy, příp. ke zlepšení únosnosti a mechanických vlastností kompozitu. [55; 56]



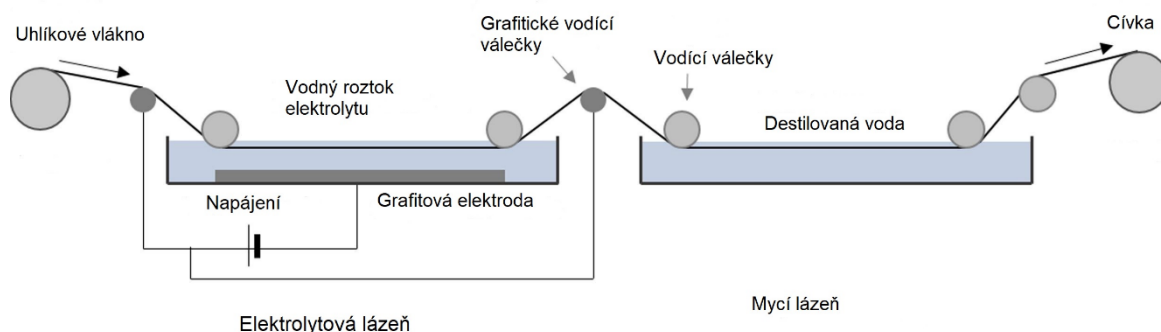
Obrázek 33 Schématické znázornění rozhraní vlákno-matrice v kompozitu

(zdroj: [55])

6.1 Modifikace vláken

6.1.1 Oxidace

Oxidace (esterifikace) je nejběžnější technikou k odizolování, zdrsňení a aktivaci povrchu vláken. Různé typy oxidací, jako je oxidace v plynné fázi, kapalně fázi, elektrochemická a katalytická oxidace, se používají k vytvoření různých aktivních funkčních skupin a také drsnosti povrchu vláken. Při oxidaci v plynné fázi se vlákno zpracovává za vysoké teploty a tlaku v plynech obsahujících kyslík nebo plynné směsi, aby se zvýšila drsnost povrchu a aktivní funkční skupiny. Oxidace vláken v kapalně fázi se obvykle provádí ponořením vláken do kapalněho oxidačního činidla nebo oxidačního média při relativně nízké teplotě, aby se vytvořily reaktivní funkční skupiny pro zlepšení chemické vazby a smáčivosti na rozhraní matrice a vlákna. Na povrch vláken se nanášejí různé typy funkčních skupin kyslíku (například karbonyl, karboxylová kyselina a hydroxyl) za použití silných oxidačních činidel, jako je kyselina dusičná, kyselina octová a peroxid vodíku, kyselina sírová a dichroman draselný. Teplota, reakční doba, množství katalyzátoru a polarita rozpouštědla ovlivňují stupeň modifikace. Vysoká polarita rozpouštědel může mít za následek vyšší rychlost esterifikace v důsledku dostupnosti exponovaných hydroxylových skupin působením bobtnajících rozpouštědel. Při oxidacích v plynné a kapalně fázi je však vnitřní pevnost vláken poškozena v důsledku leptání a nekontrolovatelných oxidačních podmínek, a to navzdory kontrole parametrů, jako je doba trvání, koncentrace a teplota oxidace. Tyto technologie mají také problémy související se znečištěním životního prostředí a zdravotními riziky v důsledku použití oxidačních chemikálií a silných kyselin. [40; 55]



Obrázek 34 Schéma anodické oxidace vláken

(zdroj: [60])

Elektrochemická oxidace je rychlejší a homogennější přístup k úpravě povrchu vláken. Vlastnosti závisí na výběru specifických elektrolytů, potenciálu, proudové hustoty a doby trvání procesu. Při metodě elektrochemické oxidace je vlákno oxidováno pomocí grafitové anody a alkalického nebo kyselého roztoku elektrolytu. [55]

6.1.2 Modifikace plazmou

Fyzikální aktivace povrchu vláken pomocí plazmy je jednou z nejběžnějších technik. Jedná se o účinnou a ekologickou metodu bez ovlivnění objemových mechanických vlastností. Nevýhodou však je drahé zařízení. Obecně platí, že plazma ovlivňuje povrch vláken reakcí s ionty, radikály, volnými elektrony, atomy a neutrálními atomy nebo molekulami. Nejběžnějšími plazmovými plyny jsou amoniak (NH_3), helium (He), N_2 a vodík (H_2). Působením plazmy se snižuje hladkost povrchu vláken, zatímco drsnost povrchu se zvyšuje. Je to proto, že molekulární vrstva se při vystavení plazmě deformuje. Tvorba mikrodůlků na povrchu vláken vede ke zvětšení povrchové plochy i drsnosti povrchu. To má za následek zvýšení pevnosti spoje s matricí a smáčivosti vláken. Na povrchu vláken nebo polymerů lze prostřednictvím plazmových procesů dosáhnout různých efektů, jako je zesíťování, zavádění volných radikálů a změna povrchové energie. Argon, helium a mohou odstranit nečistoty z povrchu vlákna leptáním. Plazma může indukovat volné radikály na povrchu vlákna abstrahováním atomu vodíku z povrchu vlákna. Může také reagovat s různými funkčními skupinami, čímž dochází k zásadní změně v chemické struktuře a smáčivosti vlákna s matricí. [40; 55; 56; 58]

6.1.3 Modifikace nanoplňivy

V poslední době je roubování nebo nanášení různých nanoplňiv na vlákna jednou z nejžádanějších technik pro zlepšení mezifázové interakce mezi vlákny a polymerní matricí. Většina nanoplňiv působí jako přemostující prvky mezi vláknem a polymerní matricí. Zvyšují jejich mechanické propojení k lepšímu přenosu zatížení nebo napětí z polymerní matrice na vlákno. Mezifázová adhezní vazba je převážně určena molekulární strukturou nanoplňiva a typem jeho interakce s vláknem a polymerní matricí. Nanoplňiva na bázi uhlíku zvyšují smáčivost vláken, což vede k silné mezifázové adhezní vazbě s polymerní matricí a také ke zvýšení drsnosti povrchu vláken. To například omezuje vytažení vláken z polymerní matrice při axiálním zatížení. Nanášení nanoplňiv však není příliš vhodné pro aplikace u skelných vláken. [55; 56]

Díky elektrické vodivosti uhlíkových vláken se pro jejich povrchovou modifikaci využívá elektroforetická depozice (EPD). Mezi další výhody této metody patří nízká cena a jednoduchý proces k dosažení rovnoměrného nanášení s kontrolou tloušťky vrstvy nanoplňiva a homogenních mikrostrukturních vlastností. V metodě EPD působí různé typy nanoplňiv na bázi uhlíku a kovů jako nabitě částice v roztoku elektrolytu v elektrickém poli a nanáší se na povrch uhlíkových vláken, která se používají jako opačně nabitě pracovní elektrody. Dalšími metodami jsou chemická depozice z plynné fáze (CVD) a chemické roubování. V procesu CVD se nanoplňiva na bázi uhlíku nanášejí na vlákna chemickými reakcemi mezi parami plynných nebo kapalných prekurzorů na bázi uhlíku. CVD výrazně zvětšuje povrchovou plochu vlákna. [55; 56]

6.2 Modifikace matrice

6.2.1 Modifikace nanoplňiv

Protože je nanášení nanoplňiv na skelná vlákna obtížné, používá se pro kompozitní materiály vyztužené sklenými vlákny modifikace matrice nanoplňivem. Nanotrubice na bázi uhlíku je rozptýlena magnetickým mícháním a v předeřátém epoxidu, aby se zabránilo nehomogenosti. Funkcionalizovaná nebo oxidovaná uhlíková nanotrubice vykazuje lepší disperzi v epoxidové matrici díky silné mezifázové interakci, což má za následek lepší stupeň adheze s vláknem a usnadňuje snadný přenos zatížení. Při vysokých teplotách dochází na rozhraní vláken a matrice k tepelnému namáhání v důsledku rozdílu v tepelné roztažnosti, což má za následek odlepení rozhraní. Přítomnost silných mezifázových adhezních vazeb mezi funkcionalizovanými uhlíkovými nanotrubičkami a epoxidem však omezuje proces odstraňování vazby ve srovnání s nemodifikovaným kompozitem ze skelných vláken a epoxidové matrice. Stejnou metodou lze do polymerní matrice přidávat také různé typy neuhlíkatých nanoplňiv z látek jako Al_2O_3 , TiO_2 , oxid křemičitý nebo jílu. Tyto typy nanočástic také významně posilují mezifázovou adhezní vazbu mezi vláknem a polymerní matricí, což se pak odráží ve zlepšení mechanických vlastností. [55; 56]

6.2.2 Zvýšení elektrické vodivosti

Díky vysoké pevnosti a vyšší odolnosti proti korozi proti konvenčním kovovým materiálům se kompozitní materiály v leteckém průmyslu používají i pro konstrukce křídel, trupu, stabilizátorů nebo skříní turbín. Kompozitní materiály však vykazují nižší elektrickou vodivost než kovy, zejména ve směru průchozí tloušťky. Toto omezení činí kompozitní

konstrukce zranitelné například vůči zásahu bleskem. Pro zvýšení elektrické vodivosti se používá několik metod. Nejpoužívanějšími způsoby jsou modifikace pryskyřice přidáním vodivého plniva a náhrada pryskyřice jiskrově vodivými polymery (ICP, z angl. Intrinsically Conductive Polymers). [57]

Jako přídatná plniva matrice za účelem zvýšení vodivosti se používají různé nanouhlíkové materiály, jako jsou nanotrubičky, grafen, uhlíková nanovlákna nebo saze. Aplikovat lze také různá kovová plniva. Metody modifikací pryskyřice pomocí ICP se pro aplikace v leteckém průmyslu zaměřují zejména na využití polyanilinu (PANI) jako vodivého média. PANI se mísí v určitém poměru (nejčastěji 20 až 70 %) s epoxidovou pryskyřicí, což vede ke zlepšení vodivých vlastností. Další možností je náhrada pryskyřice za matici na bázi PANI. PANI se mísí s dalšími přísadami za účelem získání požadovaných vlastností, a dále i se síťovacím polymerem, například divinylbenzenem (DVB). [57]

Přidání vodivého plniva na bázi nanočástic přináší výhody jako velký povrch nanočástic, nízkou hmotnost a vysokou elektrickou vodivost. Mezi nevýhody patří zvýšení viskozity pryskyřice, špatné smáčení vláken a slabší mezifázové vazby. Použití ICP oproti nanoplňivu vykazuje nižší elektrické a mechanické vlastnosti. Mezi výhody ICP však patří lepší zpracovatelnost a ekologická stabilita. Oproti nanoplňivům se jedná také o levnější způsob modifikací. [57]

6.2.3 Zvýšení chemické interakce mezi maticí a výztuží pomocí vazebního činidla

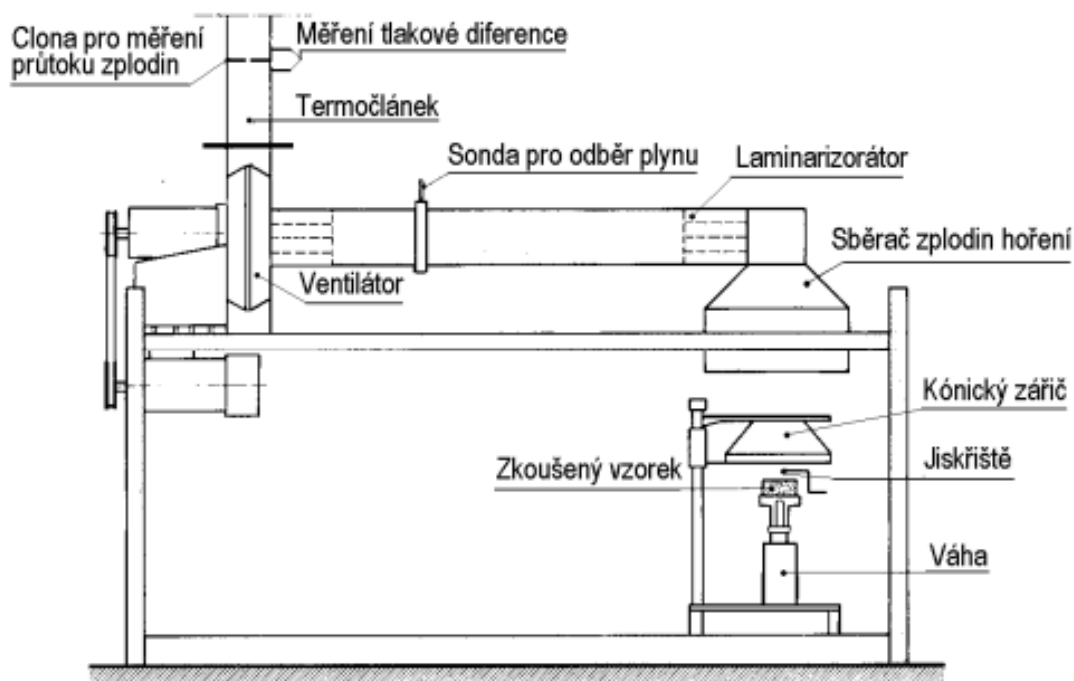
Chemická interakce mezi výztuží (vlákny) a polymerní maticí na rozhraní může být tvořena chemickou vazbou, pokud jsou ovšem na povrchu vlákna přítomny nějaké reaktivní funkční skupiny. Jednou z nejběžnějších technik pro vytvoření chemické vazby mezi vláknem a polymerní maticí je začlenění vazebných činidel. Jedna funkční skupina těchto činidel reaguje s reaktivními chemickými skupinami přítomnými na povrchu vláken a druhá funkční skupina reaguje s reaktivními chemickými skupinami polymerní matrice. Nejběžněji se aplikují činidla obsahující silanové skupiny. Při vazební reakci reagují přítomné hydroxylové skupiny přítomné na povrchu vláken s polysiloxanovou sítí, která se vytváří hydrolytickou reakcí a následuje polykondenzační reakce v přítomnosti přísad nebo katalyzátoru (kyseliny nebo zásady) organosilanů. Ostatní dostupné funkční skupiny siloxanu by měly být kompatibilní pro chemické reakce s použitou polymerní maticí. [55]

7 ZKOUŠKY HOŘLAVOSTI

Požární odolnost polymerů lze určit podle různých faktorů, jako je vznětlivost, rychlost šíření plamene a uvolňování tepla. K porovnání účinnosti různých typů zpomalovačů hoření se provádí standardní zkoušky hořlavosti. Každá ze zkoušek představuje specifické podmínky a koreluje s možnými scénáři požáru. [10; 52]

7.1 Kónická kalorimetrie

Kónická (kuželová) kalorimetrie, standardizována dle ISO 5660, je jednou z nejužitečnějších metod pro testování chování materiálu při hoření. Metoda je založena na měření poklesu koncentrace kyslíku ve spalínách vzorku na základě daného tepelného toku. Při tom jsou sledovány různé parametry jako rychlost uvolňování tepla (HRR, z angl. Heat Release Rate), maximální rychlost uvolňování tepla (PHRR, z angl. Peak Heat Release Rate), celkové uvolnění tepla, rychlost ztráty hmoty, dobu do vznícení (TTI, z angl. Time to Ignition) nebo množství generovaného kouře. Tato zkouška umožňuje také charakterizovat dobu vznícení, dobu hoření nebo zániku, úbytek hmoty během spalování, množství uvolněného kouře a podíl CO a CO₂. [10; 50; 51; 52]



Obrázek 35 Schéma kuželového kalorimetru

(zdroj: [6])

Vzorek o rozměrech 100 x 100 mm je vystaven konstantnímu tepelnému toku (dle ISO 5660 obvykle 35 kWm^{-2}). Zdrojem tepelného toku je elektrický odporový kónický zářič. Generované spaliny jsou zachycovány sběračem zplodin hoření. Z proudu zplodin hoření je pomocí sondy kontinuálně odebírán vzorek, který je průběžně analyzován. Určován je zejména obsah kyslíku, ale také je stanovována koncentrace CO, CO₂, H₂O, příp. dalších plynů, a hustota kouře. Měření průtoku spalin a koncentrace kyslíku se používá k výpočtu rychlosti uvolňování tepla (HRR). HRR je pravděpodobně nejpoužívanějším parametrem pro hodnocení požárních vlastností materiálů. Dalším důležitým parametrem je maximální rychlost uvolňování tepla (PHRR) vyjadřující snadnost hoření a intenzitu plamenů. [6; 10; 50; 51; 52]

7.2 Průtoková kalorimetrie pyrolýzního spalování

Průtoková kalorimetrie pyrolýzního spalování (PCFC, z angl. Pyrolysis Combustion Flow Calorimetry) je požární zkouška pro hodnocení hořlavosti vzorků o velmi malé velikosti. Původně byla vyvinuta Federálním úřadem pro letectví ve Spojených státech se záměrem identifikace ohnivzdorných polymerů pro použití v komerčních letadlech. V poslední době se však PCFC používá k hodnocení hořlavosti polymerů s obsahem zpomalovačů hoření. PCFC simuluje hoření polymerní pevné látky a samostatně reprodukuje procesy spalování v pevné i plynné fázi. Toho je dosaženo řízenou pyrolýzou vzorku o hmotnosti několika miligramů v proudu inertního plynu (například dusíku) s následnou vysokoteplotní oxidací těkavých produktů pyrolýzy. Spalné teplo produktů pyrolýzy se měří pomocí kalorimetrie spotřeby kyslíku. Výhodou PCFC je vyžadování pouze malých vzorků (5 až 50 mg). PCFC má také schopnost odděleně měřit spalování těkavých a netěkavých látek. [50]

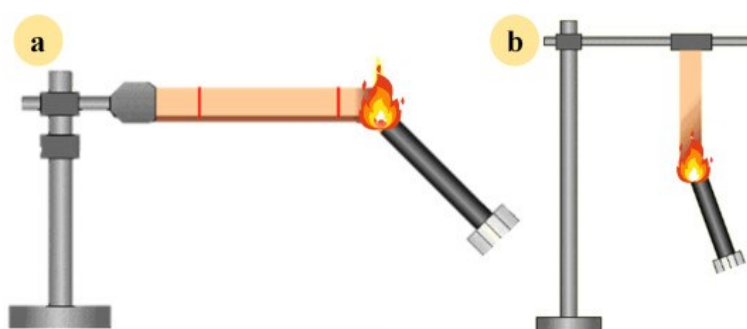
7.3 Termogravimetrická analýza

Termogravimetrická analýza (TGA) sleduje změny hmotnosti materiálu v závislosti na čase nebo teplotě pomocí termogravimetrického analyzátoru (TG). Metoda spočívá v kontinuálním snímání hmotnosti vzorku v závislosti na lineárně stoupající teplotě. Výsledkem analýzy je termogravimetrická křivka, jejíž součástí často bývá diferenciální křivka, ze které je následně možno určit rychlost změny hmotnosti v závislosti na teplotě. Termogravimetrická analýza dále dokáže analyzovat hned několik vlastností a parametrů materiálu, jako jsou termodegradace, vznícení, vyhoření nebo reaktivita. Pomocí termogravimetrické analýzy lze také vyhodnocovat procesy jako pyrolýza, zplyňování nebo spalování. Mezi výhody termogravimetrické analýzy patří snadná obsluha, minimální

nároky na množství zkoušeného materiálu, přesná kontrola a záznam teploty a úbytku hmotnosti vzorku. [6; 10; 53; 54]

7.4 UL 94

Mezi rozšířené zkoušky hořlavosti patří také zkouška UL 94, která sleduje dobu potřebnou k samouhašení a přítomnost hořících kapek. Výhodou této zkoušky je jednoduché provedení i bez specializovaného vybavení. Vzhledem k principu zkoušky je ale vhodná spíše pro soudržnější materiály než pro materiály se sklony k tečení. Podle typu zkoušeného materiálu se rozlišují dvě varianty této zkoušky – horizontální a vertikální. [10; 50; 52]



Obrázek 36 Test UL-94 a) horizontální b) vertikální

(zdroj: [51])

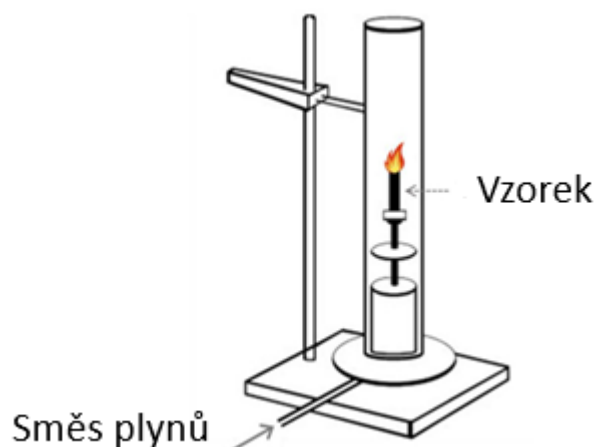
Horizontální zkouška se využívá především u sypkých a pěnových materiálů. Vzorek je upnut ve vodorovné poloze, přičemž na volný konec působí plamen. Zaznamenává se doba, za kterou se plameny rozšíří až ke značce 100 mm. Nejvyšší klasifikaci HB obdrží materiál, u jehož vzorku o tloušťce mezi 3 a 13 mm je rychlost šíření plamene menší než 40 mm/min. Pokud je tloušťka vzorku menší než 3 mm, pak pro získání nejvyšší klasifikace musí být rychlost šíření plamene menší než 75 mm/min. [52]

Vertikální zkouška je v praxi rozšířenější. Vzorek o velikosti 127 x 12,7 mm je upnut ve svislé poloze. Na jeho volný konec působí plamen po dobu 10 sekund. Po uhašení materiálu se opět nechá působit plamen na vzorek po dobu dalších 10 sekund. V průběhu zkoušky je také sledována přítomnost hořících kapek a jakékoliv vznícení vrstvy bavlny umístěné pod vzorkem. Pro standardní vyhodnocení je testováno 5 vzorků. V rámci vyhodnocení je materiál klasifikován do tříd V-0, V-1 a V-2. Hodnocení V-0 materiál dosáhne, pokud spalování ustane do 10 sekund, hořící kapky se sice uvolňují, ale nedochází ke vznícení. Hodnocení V-1 je uděleno, pokud materiál přestane hořet do 30 sekund, hořící

kapky se uvolňují, ale nedochází ke vznícení. Nejnižší hodnocení V-2 se od V-1 liší pouze tím, že dochází ke vznícení bavlněné vrstvy. [10; 50; 52]

7.5 Limitní index kyslíku (LOI)

Limitní index kyslíku (LOI, z angl. Limiting Oxygen Index) představuje minimální koncentraci kyslíku ve směsi kyslíku a dusíku, která dokáže udržet plamenné hoření. Zkouška se měří na vzorku svisle umístěném ve středu skleněného komína. Směs plynů proudí proti proudu komínem, prochází vrstvou skleněných kuliček, a tak se homogenizuje. Po 30 vteřinách se horní část vzorku zapálí. Pokud dojde ke vznícení, koncentrace kyslíku se sníží. Pokud ke vznícení nedojde, koncentrace kyslíku se naopak zvýší, dokud není nalezen LOI. Vzhledem k tomu, že vzduch obsahuje 21 % kyslíku, jsou materiály s hodnotami LOI nižšími než 21 klasifikovány jako hořlavé, s hodnotami LOI vyššími než 21 jsou klasifikovány jako samozhášivé, protože jejich spalování nelze udržet bez vnější energie. Znamená to, že materiály s vysokou hodnotou LOI obecně vykazují lepší vlastnosti zpomalující hoření. Přestože je tato zkouška považována za relativně nesofistikovanou, zůstává jedním z nejdůležitějších nástrojů screeningu a kontroly kvality v plastikářském průmyslu. Výhody LOI spočívají v pohodlném a reprodukovatelném prostředí pro stanovení míry hořlavosti a nízkých nákladech na zkušební zařízení. Nevýhodou je naopak nepřesnost s ohledem na reálné podmínky požáru. Zkouška se provádí za pokojové teploty, zatímco při požáru je teplota kolem materiálu výrazně vyšší. Hodnoty LOI se zvyšující se teplotou klesají. Tzn., že materiály s vysokými hodnotami LOI mohou za intenzivních podmínek požáru hořet bez efektu samozhášení. [10; 50; 52]



Obrázek 37 Zkušební zařízení LOI

(zdroj: [10])

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Záměrem diplomové práce je porovnání mechanických vlastností a odolnosti proti hoření dvou systémů kompozitních materiálů na bázi epoxidové pryskyřice s výztuží v podobě lněné tkaniny. Zvolené systémy epoxidové pryskyřice se liší procentuálním obsahem biologické složky v pryskyřici. Kromě toho bude také testován vliv příměsí retardantu do pryskyřice či výztuže na mechanické vlastnosti a hořlavost. Pro každý ze zvolených systémů budou testovány čtyři materiálové kombinace:

Tabulka 5 Návrh kombinací materiálů pro experiment

Materiálová kombinace	Výztuž	Matrice
1	Len	Epoxid
2	Len	Epoxid + práškový retardant
3	Len + práškový retardant	Epoxid
4	Len + práškový retardant	Epoxid + práškový retardant

(zdroj: vlastní)

Postup při vypracování praktické části se skládal z těchto kroků:

1. Vypracování literární rešerše s pomocí odborných zdrojů.
2. Příprava semiproduktů systému využívající pryskyřici na biologické bázi.
3. Analýza a testování vytvořených semiproduktů.
4. Vyhodnocení dosažených výsledků.

9 VOLBA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIE VÝROBY SEMIPRODUKTŮ

9.1 Matrice

Epoxidové pryskyřice se vyznačují velmi dobrými mechanickými a tepelnými vlastnostmi, nízkým smrštěním při vytvrzování, velmi dobrou chemickou odolností, vysokou tepelnou odolností a výbornou přilnavostí k výztužným vláknům. Díky těmto vynikajícím vlastnostem se epoxidové pryskyřice používají v mnoha aplikacích. Dvousložkové epoxidové systémy, které jsou výsledkem směsi epoxidové pryskyřice (díl A) a aminového vytvrzovacího činidla (díl B), nabízejí možnost získat různé vlastnosti kombinací různých dílů A a B. Směs epoxidové pryskyřice a aminového vytvrzovacího činidla (epoxidový systém) je reaktivní kapalina, která podléhá exotermické síťovací reakci, během níž se uvolňuje teplo. Po smíchání obou složek se viskozita směsi pomalu zvyšuje v důsledku zesíťování. Pro testování a vyhodnocení výsledků byly zvoleny dva dvouložkové systémy s obsahem biologické složky od výrobce Cardolite Corporation. [82]

9.1.1 Systém epoxidové pryskyřice I

Jako první systém byla zvolena kombinace epoxidové pryskyřice FormuLITE 2501A a vytvrzovacího činidla FormuLITE 2401B. Tento systém obsahuje 34 hmotnostních % biologické složky. Pryskyřice 2501A je epoxidová pryskyřice bisfenolového typu. Obsahuje více než 80 % 2,2-bis[4-(2, 3-epoxypropoxy)fenyl]-propanu a méně než 20 % extraktu z ořechových skořápek *Anacardium occidentale* (tropický strom ledvinovník západní), dekarboxylovaných destilovaných oligomerizačních produktů s 1-chlor-2, 3-epoxypropanem. Jedná se o čirou kapalinu. Aminové vytvrzovací činidlo FormuLITE 2401B je směs alifatických a cykloalifatických sloučenin s obsahem méně než 55 % 3-aminomethyl-3,5,5-trimethylcyklohexylaminu. Vytvrzovací činidlo je světle žlutá kapalina. Přílohou číslo I této diplomové práce je materiálový list systému Cardolite® FormuLITE 2501A + 2401B, vybrané vlastnosti systému vyjadřuje tabulka 6.

Tabulka 6 Vybrané vlastnosti systému Cardolite® FormuLITE 2501A + 2401B

Vlastnost	Hodnota
Hmotnostní mísicí poměr	100:31
Objemový mísicí poměr	100:37
Viskozita systému při 25 °C	905 cPs
Doba zpracovatelnosti (100 g směsi při 23 °C)	95 min
Teplota skelného přechodu Tg	100 °C
Pevnost v tahu	69 MPa
Pevnost v ohybu	113 MPa
Obsah biologické složky	34 hm. %

(zdroj: [82])

9.1.2 Systém epoxidové pryskyřice II

Pro druhý systém byla zvolena kombinace epoxidové pryskyřice FormuLITE 2502A a vytvrzovacího FormuLITE 2401B, kdy tento systém obsahuje 27 hmotnostních % biologické složky. Pryskyřice 2502A je epoxidová pryskyřice na bázi diglycidyletheru bisfenolu A s obsahem biologické složky na bázi kardanolu, což je vedlejší produkt zpracování kešu ořechů. Přílohou číslo II této diplomové práce je materiállový list systému Cardolite® FormuLITE 2502A + 2401B, vybrané vlastnosti vyjadřuje tabulka 7.

Tabulka 7 Vybrané vlastnosti systému Cardolite® FormuLITE 2502A + 2401B

Vlastnost	Hodnota
Hmotnostní mísicí poměr	100:33
Objemový mísicí poměr	100:40
Viskozita systému při 25 °C	480 cPs
Doba zpracovatelnosti (100 g směsi při 23 °C)	125 min
Teplota skelného přechodu Tg	88 °C
Pevnost v tahu	66 MPa
Pevnost v ohybu	96 MPa
Obsah biologické složky	27 hm. %

(zdroj: [82])

9.2 Výztuž

Kompozitní materiály se skládají z matrice a výztuže. Pro experiment byla zvolena výztuž v podobě lněné tkaniny. Lněná vlákna se vyznačují výbornými mechanickými vlastnostmi, vysokou houževnatostí a nízkou hustotou. Lněná vlákna jsou vhodnou alternativou z hlediska udržitelnosti, protože pěstování lnu je možné téměř po celém světě. Lněná výztuž nachází své využití zejména v automobilovém průmyslu.



Obrázek 38 Struktura zvolené lněné tkaniny

(zdroj: vlastní)

9.3 Retardant

Jako retardant byla zvolena prášková forma dihydrogenfosforečnanu amonného ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, fosforečnan monoamonný). Jedná se o bílou krystalickou látku, která je snadno rozpustná ve vodě. Naopak těžce se rozpouští v alkoholu a je nerozpustná v acetonu. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ se používá k přípravě vícesložkových hnojiv. Využití nachází také v potravinářství, například jako kypřící prášek. Pro svůj vysoký obsah dusíku a fosforu se vyznačuje retardačními vlastnostmi, proto se aplikuje také jako zpomalovač hoření pro dřevo, papír a různé tkaniny. Používá se také ve farmacii nebo při výrobě tištěných spojů. Přílohou číslo III této diplomové práce je materiálový list dihydrogenfosforečnanu amonného. [89; 92; 93]

Tabulka 8 Vybrané vlastnosti dihydrogenfosforečnanu amonného

Vlastnost	Hodnota
Molární hmotnost	115,03 g/mol
Vzhled	bílá krystalická látka
Bod tání	190 °C
Rozpustnost ve vodě při 20 °C	368 g/l
pH (5 % roztok)	4,0 – 5,0
Vzhled roztoku (10 % vodný)	čirý, bezbarvý
Obsah	min. 99 %
Chloridy	max. 0,005 %
Železo	max. 0,002 %
Sírany	max. 0,01 %

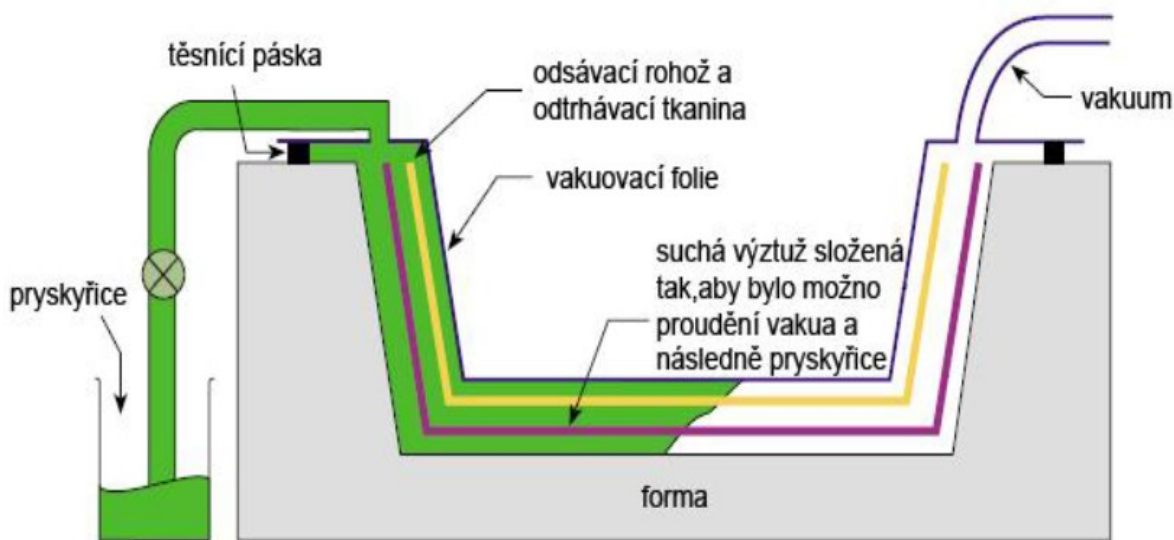
(zdroj: [92; 93])

Obrázek 39 Dihydrogenfosforečnan amonný ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)

(zdroj: vlastní)

9.4 Technologie výroby semiproduktů

Výchozí technologií pro výrobu semiproduktů pro zkušební tělíska v podobě plochých desek byla zvolena vakuová infuze. Proces vakuové infuze využívá diferenční tlak mezi uzavřeným systémem formy a atmosférickým tlakem v okolí formy. Oproti ručnímu kladení je vakuová infuze čistším procesem a eliminuje kontakt pracovníka s epoxidovou pryskyřicí. Epoxidová pryskyřice totiž může vyvolávat alergické reakce. Celý proces výroby vakuovou infuzí zahrnuje přípravu výztuže a pomocných materiálů, jako je strhávací tkanina nebo odsávací rohož. Do dutiny formy jsou následně vloženy hadičky pro přívod pryskyřice a vytvoření vakua v systému. Celá forma je následně po obvodu utěsněna pomocí vakuového rukávu. Použitím vývěvy je v dutině formy následně vytvořeno vakuum. Rozdíl tlaků v dutině formy a v okolí pak přitlačí laminát na plochu dutiny formy, čímž dochází k jeho zhutnění. Při běžných atmosférických podmínkách poté dochází k vytvrzení. Pro vytvrzení lze využít i procesu označovaným jako post curing (dotvrzování). [80]



Obrázek 40 Schéma technologie vakuové infuze

(zdroj: [81])

10 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Před zahájením vlastního experimentu bylo nutné stanovit optimální podmínky dovytvrzovacího procesu vyráběných semiproductů k dosažení co nejlepších mechanických a fyzikálních vlastností pomocí dynamické mechanické analýzy (DMA) a zvolit výši procentuální příměsi retardantu v semiproductech. Pro DMA bylo nezbytné vyrobit zkušební desku navržené materiálové skladby kompozitu.

10.1 DMA

Dynamická mechanická analýza (DMA) je účinným nástrojem ke stanovení morfologie a viskoelastických vlastností polymerních a kompozitních materiálů. Princip DMA je založen na sledování viskoelastické odezvy materiálu podrobenému malému oscilačnímu napětí. Viskoelastická odezva se skládá ze dvou částí modulu E^* - reálné části reprezentující elasticitu (E') a imaginární části představující viskozitní (útlumovou, ztrátovou) složku (E''). Toto rozdělení modulu do dvou částí popisuje dva nezávislé procesy uvnitř materiálu – elasticitu a viskozitu. Celkový modul je pak roven součtu obou složek

$$E^* = E' + E'' \quad (1)$$

Výpočtem lze také stanovit fázový úhel, o který se deformace zpožďuje za vyvozeným napětím

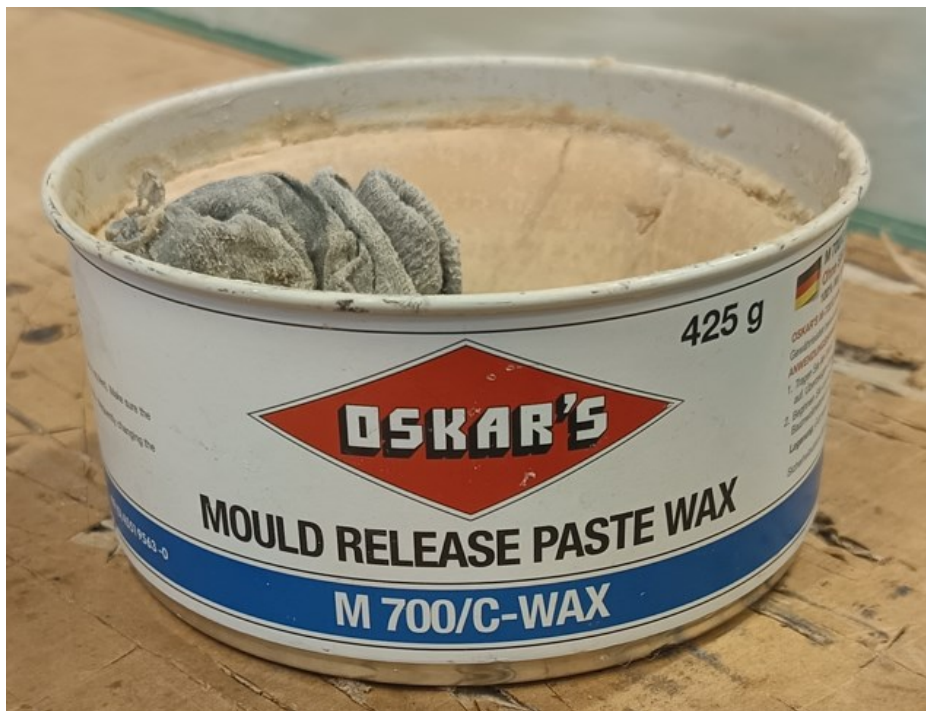
$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (2)$$

Zkušební zařízení se skládá ze dvou vyvážených rovnoběžných ramen uložených na torzních pružinách. Mezi ramena se pak upne vzorek. Celé zařízení je umístěno v temperovaném prostředí dovolující měřit v širokém rozsahu teplot. Metoda stanovuje závislost modulu a ztrátového úhlu na teplotě, příp. čase. Tím poskytuje údaje o mechanických vlastnostech. Pomocí DMA lze charakterizovat širokou škálu parametrů, mezi které patří například teplota skelného přechodu, bod tání, stupeň krystalizace či bod zesíťování. [91]

10.1.1 Výroba semiproductu pro DMA

Pro výrobu semiproductu pro DMA byla zvolena plochá deska o rozměrech 300 x 400 mm zaformovaná pomocí skleněné tabule. Z této desky budou následně laserem vyřezány vzorky o požadovaných rozměrech pro DMA.

Zvolenou skleněnou tabuli bylo nejprve nutné očistit od nečistot pomocí špachtle a acetonového ředidla. Dalším krokem byla separace formy separačním voskem Oskar's M-700/C pro snadnější sejmutí semiprojektu z povrchu dutiny formy. Na skleněnou desku se nanasla vrstva vosku, která se nechala přibližně 15 minut zaschnout. Následně se tato vrstva separačního vosku ručně vyleštila za použití papírových ubrousků. Tento postup byl opakován, dokud forma nebyla naseparována třemi vrstvami vosku.



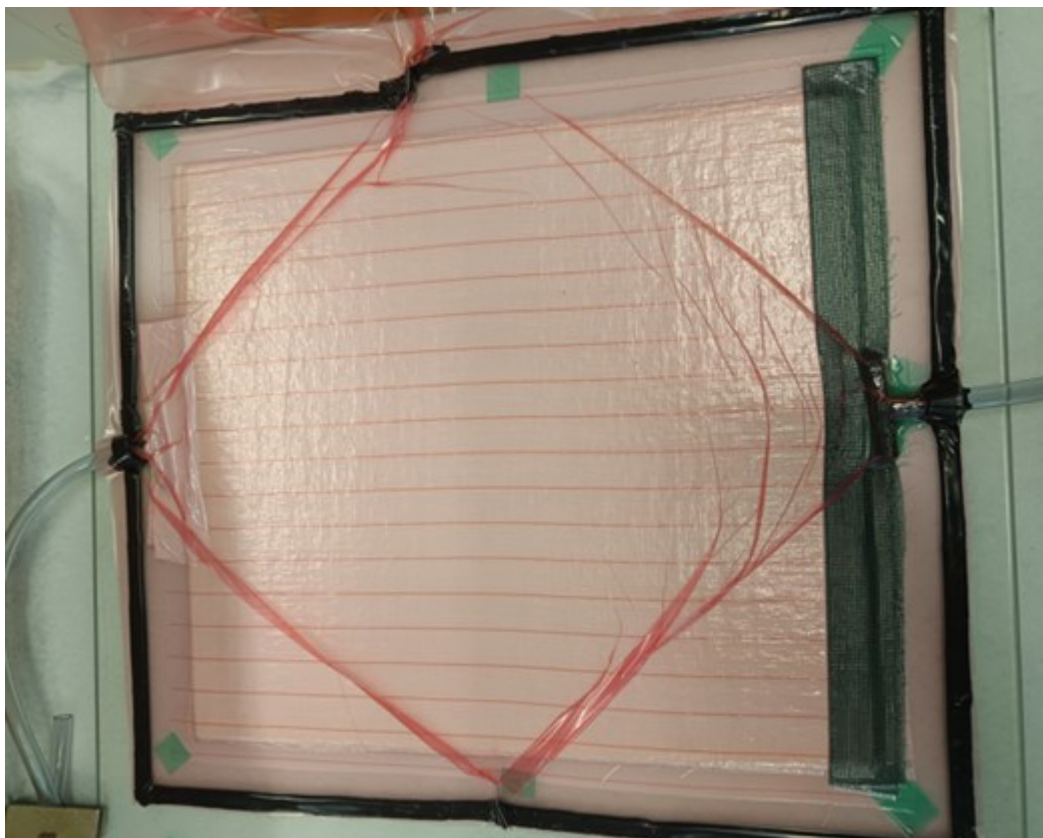
Obrázek 41 Separací vosk M-700/C

(zdroj: vlastní)

Souběžně se separací byla provedena příprava výztužné lněné tkaniny pro výrobu kompozitní desky. Z role tkaniny byly vystřihovány obdélníky o rozměrech 300 x 400 mm, přičemž pro výrobu desky bylo použito 6 vrstev tkaniny. Současně byly připravovány pomocné materiály jako je odtrhová tkanina, rozvodná rohož, odsávací rohož, vakuová folie pro technologii vakuové infuze, těsnicí pásy, lepicí pásy pro uchycení výztuže a odtrhávací tkaniny, hadičky pro vytvoření vakua pomocí vývěvy a přívod epoxidové pryskyřice do formy a svorky pro zaškrcení hadiček.

Ze všech připravených materiálů byla následně vytvořena forma pro vakuovou infuzi. Všechny 6 vrstev lněné tkaniny se uložilo na naseparovanou skleněnou desku a přikrylo odtrhovou tkaninou. Oba materiály byly přilepeny lepicí páskou k podkladové desce. V místě předpokládaného přítoku pryskyřice byla vytvořena vtoková soustava z rozvodné

rohože a plastového rozbočovače, který se připojil na hadičku. Obdobným způsobem se připravil také vývod pro napojení vakuové vývěvy. Následně byla na skleněnou desku přilepena oboustranně lepící těsnící páska, na kterou se poté přilepila vakuová fólie. Svorkou byla zaškrncena přívodní hadička a na výstupní hadičku se připojila vývěva. Po vytvoření vakua ve formě se svorkou zaškrtila výstupní hadička, čímž byla vývěva odstavena. Během následujících 10 minut byl celý systém kontrolován pro případné netěsnosti.



Obrázek 42 Připravena forma pro výrobu semiprojektu pro DMA

(zdroj: vlastní)

Po vytvoření vakua ve formě se dle materiálových listů připravila směs systému Cardolite® tvořeného z epoxidové pryskyřice FormuLITE 2501A a vytvrzovacího činidla FormuLITE 2401B v hmotnostním poměru 100:31. Pro výrobu jedné desky se použilo 400 g pryskyřice 2501A a 124 g vytvrzovacího činidla. Po provedení vakuové infuze se vyrobená deska nechala vytvrdnout za pokojové teploty po dobu 24 hodin.



Obrázek 43 Systém Cardolite® – vlevo epoxidová pryskyřice 2501A, vpravo vytvrzovací aminové činidlo 2401B

(zdroj: vlastní)

10.1.2 Výsledky DMA

Z vytvrzených desek byly následně vyřezány pomocí laseru zkušební tyčinky o rozměrech 10 x 3,78 mm. Tělíčko se následně vložilo do zkušebního stroje a to tak, že bylo vetknuto na obou koncích. Jeden z těchto konců je pak v rámci DMA cyklickým pohybem nahoru a dolů namáhán – metoda single canti level.

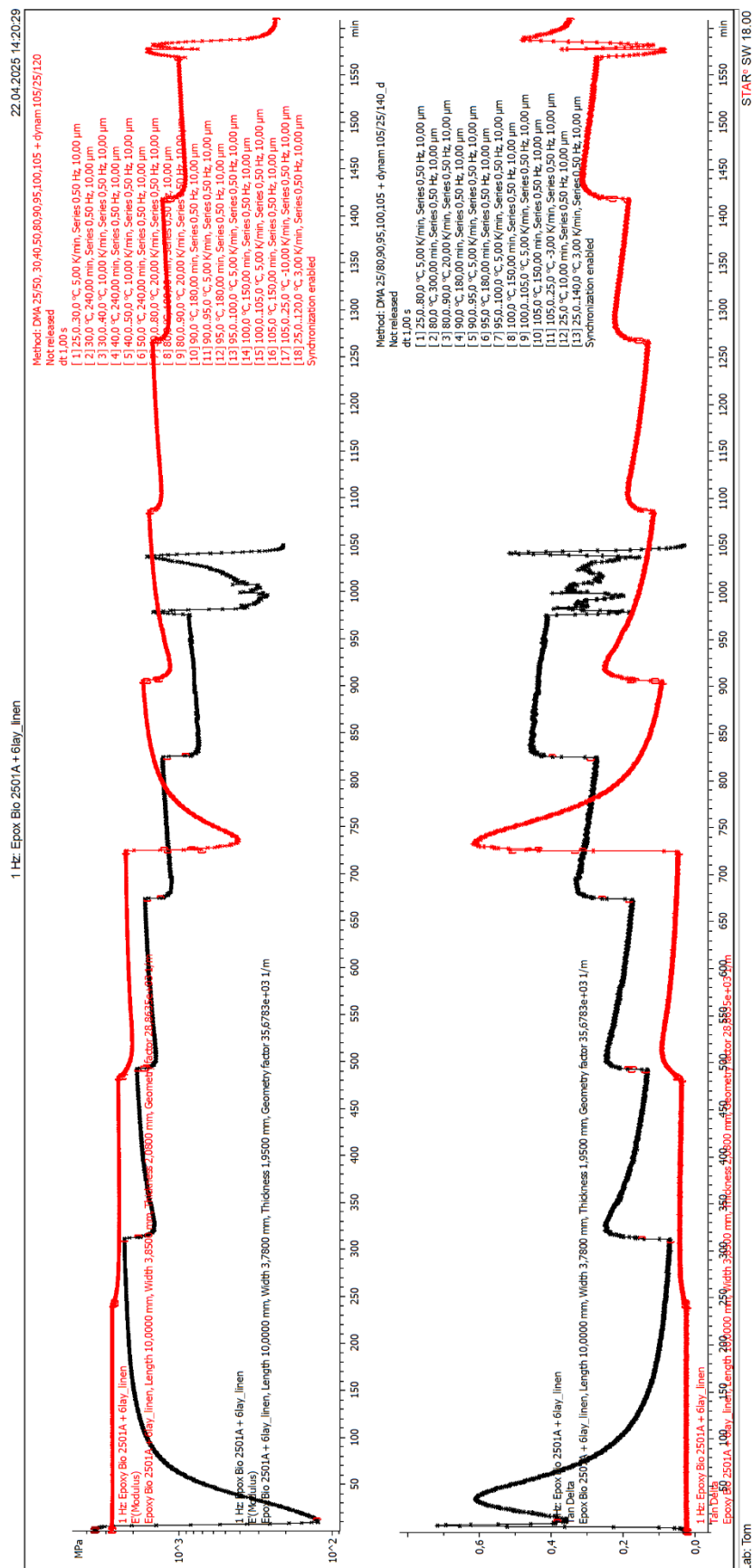
První přístup spočíval v ohřevu systému na určitou teplotu, výdrže na této teplotě a opětovnému zvýšení teploty rychlostí 5 K za minutu. Počáteční teplotou byla úroveň 30 °C. Po výdrži 240 minut se teplota zvýšila na 40 °C, po dalších 240 minutách na 50 °C. Po uplynutí dalších 240 minut se teplota zvýšila až na 80 °C. Po dosažení této teploty byla výdrž zkrácena na 180 minut a systém se ohříval po kroku 5 °C. Po dosažení 100 °C se výdrž ještě více zkrátila a to na 150 minut. Jakmile teplota v systému dosáhla úrovně 105 °C, došlo k ochlazení na pokojovou teplotu (25 °C) rychlostí 10 K za minutu.

Při tomto postupu bylo patrné, že vliv na reálnou část modulu (elasticitu) je až do teploty 50 °C prakticky zanedbatelný. Od této teploty výše byl pozorován nejdříve pokles ve prospěch viskoelastického chování a při dostatečné výdrži následně nárůst elasticity dosahující původní hodnoty. Při dosažení teploty nad 100 °C však začalo docházet ke ztrátě elasticity ve prospěch útlumové složky.

Druhý postup spočíval v ohřevu z 25 °C na 80 °C, výdrže 300 minut, ohřevu na 90 °C a setrvání na této teplotě po dobu 180 minut. Následovaly další ohřevy po 5 °C až na 105 °C a výdrže na těchto teplotách po dobu 150 minut. Posledním krokem bylo ochlazení ze 105 °C na 25 °C. Při tomto postupu byla pozorována poměrně rychlá změna ztrátové složky modulu ve prospěch elastického, a tedy rychlejší zesíťování. Naopak na úrovni pohybující se kolem 100 °C začalo docházet k nárůstu ztrátové složky. Zesíťování rychlým ohřevem na vyšší teplotu se tedy jeví, že by mohlo přinést rychlý nárůst pevnostní složky modulu, avšak tento postup může způsobovat tvarové i vnitřní deformace. Dosažené výsledky z těchto dvou postupů znázorňuje obrázek 44.

Na základě dosažených výsledků byly provedeny další dvě analýzy DMA. Jedna spočívala v ohřevu na 50 °C, výdrže na této teplotě, ohřevu na 70 °C a dále postupného ohřevu až na 110 °C. Při druhé variantě byl zvolen postupný ohřev až na 140 °C rychlostí 10 K za minutu. Při těchto postupech byly sledovány zejména změny v jednotlivých složkách modulu pružnosti. V momentě, kdy imaginární složka je vyšší než elasticita, materiál má sklony k tečení – teplota skelného přechodu T_g . Vyšší hodnota teplota skelného přechodu však pro materiál znamená nižší houževnatost. Dosažené výsledky vyjadřuje obrázek 45.

Po vyhodnocení všech dosažených výsledků byl optimalizován postup pro dovytvrzovací proces vyráběných semiproduktů. Byla zvolena varianta s ohřevem na 50 °C, výdrže a následného ohřevu na 95 °C. Při vyšších teplotách dochází ke zvyšování ztrátové složky a ke ztrátě houževnatosti materiálu.





(zdroj: vlastní)

10.2 Stanovení množství retardantu

Pro volbu hmotnostního obsahu retardantu ve výztuži a matrici pro experiment byla provedena série zkušebních vážení vzorků lněné tkaniny namáčené ve třech různých koncentracích vodného roztoku práškového retardantu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ za účelem stanovení navýšení hmotnosti takto namáčené tkaniny. Pro tato vážení byly nejprve vystřiženy testovací čtverce lněné tkaniny o rozměrech 100 x 100 mm v počtu 2 ks pro každou z koncentrací roztoku. Každý z těchto čtverců tkaniny byl zvážen na digitální váze, a to jak samostatně, tak dohromady. Celková hmotnost 6 ks tkaniny činí 7,46 g.



Obrázek 46 Lněná tkanina pro vážení

(zdroj: vlastní)

Následně se postupně připravily tři koncentrace vodného roztoku práškového retardantu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ v demineralizované vodě, a to o koncentracích 10 hmotnostních %, 20 hmotnostních % a 30 hmotnostních % retardantu ve vodě. V každé z koncentrací byly namáčeny 2 ks tkaniny. Tkaniny se vložily do připravené nádoby s vodním roztokem po dobu 10 minut, přičemž v polovině tohoto časového intervalu byly tkaniny otočeny. Po dokončení namáčení se tkaniny vložily do sušárny, kde byly při teplotě 80 °C sušeny po dobu 4 hodin. Po usušení se tkaniny zvážily pro zjištění navýšení hmotnosti vlivem zachyceného retardantu. Dosažené výsledky jsou shrnuty v tabulce 9. Při koncentraci roztoku 20 hmotnostních % retardantu ve vodě došlo k výraznějšímu nárůstu hmotnosti tkaniny než u koncentrace 10 hmotnostních %. U roztoku o koncentraci 30 hmotnostních %

není navýšení hmotnosti ve srovnání s 20 hmotnostních % tak výrazné. Proto pro experiment byla zvolena koncentrace 20 hmotnostních % $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ v demineralizované vodě.

Tabulka 9 Výsledky vážení namáčených tkanin ve vodním roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Číslo vzorku	Koncentrace roztoku retardantu ve vodě	Původní hmotnost tkaniny	Hmotnost tkaniny po usušení	Rozdíl hmotnosti	Navýšení hmotnosti
1	10 hm. %	1,236 g	1,431 g	0,195 g	15,7767 %
2	10 hm. %	1,233 g	1,369 g	0,136 g	11,0300 %
3	20 hm. %	1,225 g	1,683 g	0,458 g	37,3878 %
4	20 hm. %	1,265 g	1,714 g	0,449 g	35,4941 %
5	30 hm. %	1,246 g	1,822 g	0,576 g	46,2279 %
6	30 hm. %	1,262 g	1,867 g	0,605 g	47,9398 %

(zdroj: vlastní)

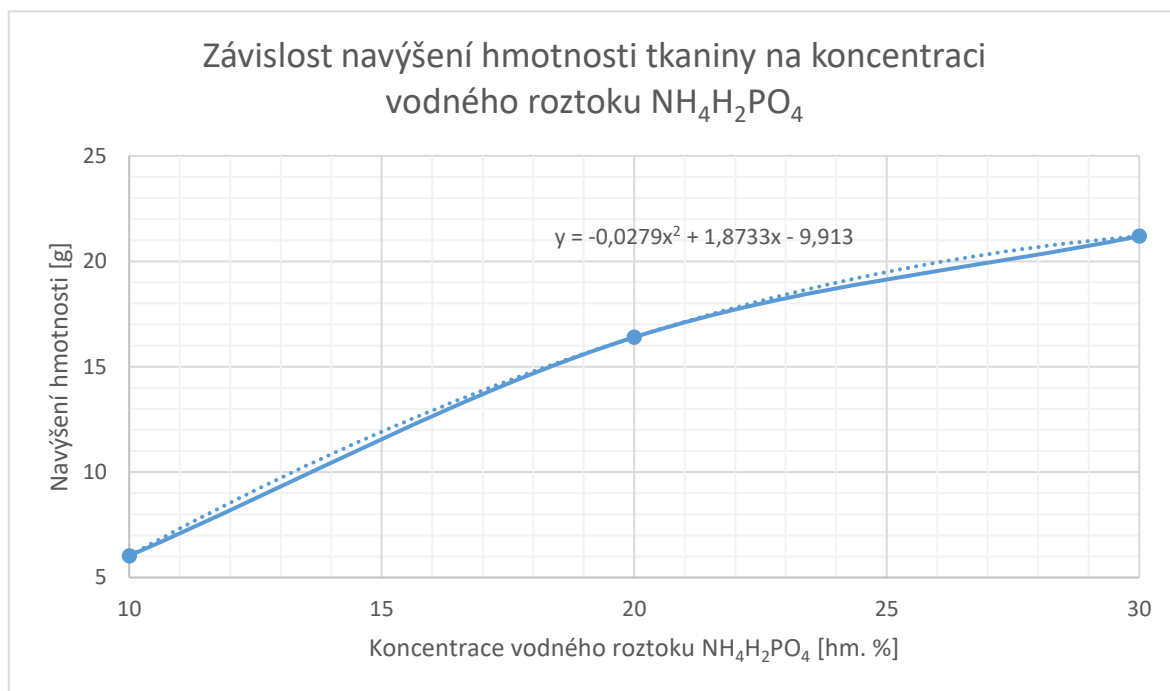
Tabulka 10 Přepočet navýšení hmotnosti namáčené lněné tkaniny ve vodním roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Číslo vzorku	Koncentrace roztoku retardantu ve vodě	Rozdíl hmotnosti	Hmotnost 6 ks tkaniny o rozměrech 200 x 300 mm	Vypočtené navýšení hmotnosti tkaniny	Průměr vypočteného navýšení hmotnosti
1	10 hm. %	0,195 g	45 g	7,0995 g	6,0315 g
2	10 hm. %	0,136 g	45 g	4,9635 g	
3	20 hm. %	0,458 g	45 g	16,8245 g	16,3984 g
4	20 hm. %	0,449 g	45 g	15,9723 g	
5	30 hm. %	0,576 g	45 g	20,8026 g	21,1877 g
6	30 hm. %	0,605 g	45 g	21,5729 g	

(zdroj: vlastní)

Pro experimentální kombinaci, kdy bude příměs retardantu obsažena jak v tkanině, tak pryskyřici, bylo nutné stanovit koncentraci vodního roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ pro namáčení lněné tkaniny. Rozměry vyráběných desek semiproductů vakuovou infuzí pro mechanické zkoušky a zkoušky hořlavosti byly zvoleny 200 x 300 mm. Lněné tkaniny, připraveny pro tyto desky v počtu 6 ks na desku, se zvážily s výsledkem 45 g. Dosažené navýšení hmotnosti

tkaniny při různých koncentracích vodného roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ dle tabulky 10 se přepočítlo na navýšení hmotnosti při celkové hmotnosti tkanin 45 g.



Obrázek 47 Grafické vyjádření závislosti průměrného navýšení hmotnosti tkaniny na koncentraci vodného roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

(zdroj: vlastní)

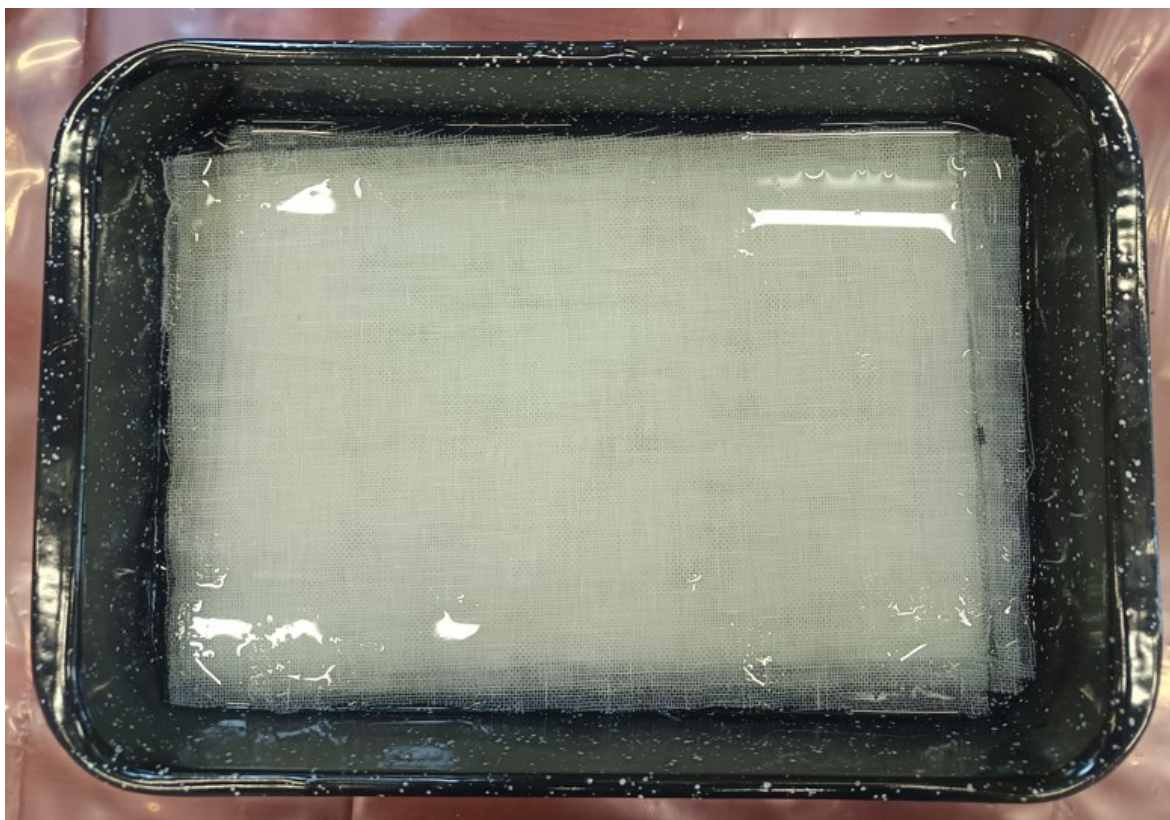
Z grafického vyjádření závislosti průměrného navýšení hmotnosti namáčené lněné tkaniny na koncentraci vodného roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ byla stanovena také matematická závislost. Při zvolené koncentraci experimentu 20 hmotnostních % $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ je průměrné navýšení hmotnosti tkaniny o 16,3984 g. Pro případ obsahu práškového retardantu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ v pryskyřici i lněné tkanině je uvažováno navýšení hmotnosti kompozitu o polovinu na straně tkaniny a o polovinu na straně epoxidové pryskyřice. Navýšení hmotnosti namáčených tkanin po usušení je tak uvažováno 8,19 g. Po dosazení do kvadratické rovnice stanovené grafickou závislostí na obrázku 45 se pak výpočtem stanovila koncentrace vodného roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ pro namáčení lněné tkaniny ve výši 11,7 hmotnostních %.

11 VÝROBA SEMIPRODUKTŮ

11.1 Příprava lněné tkaniny pro výrobu semiproduktů

Pro výrobu semiproduktů se nejdříve připravila lněná tkanina. Z role tkaniny byly vystřiženy obdélníky o rozměrech 200 x 300 mm, přičemž každá z vyráběných desek bude vyztužena 6 ks lněné tkaniny. Pro uvažovanou výrobu 8 desek se tak celkem se jedná o 48 ks tkaniny. Polovina z tohoto počtu nebude obsahovat příměs retardantu. Druhá polovina se podrobila procesu namáčení ve vodném roztoku retardantu.

Byl namíchán vodný roztok o koncentraci 20 hmotnostních % retardantu, ve kterém se 12 ks tkaniny namáčelo po dobu 5 minut. Následně se tkanina otočila a namáčela se dalších 5 minut. Po dokončení namáčení se tkaniny vložily usušit do sušárny při 80 °C po dobu 4 hodin. Usušená tkanina se následně zvážila. Podobný postup se aplikoval také pro přípravu 12 ks tkaniny pro variantu s příměsí retardantu ve výztuži i pryskyřici. Rozdílná byla pouze koncentrace vodného roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, a to 11,7 hmotnostních %. Hmotnosti usušených tkanin jsou zaznamenány v tabulce 11.



Obrázek 48 Namáčení lněné tkaniny ve vodném roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

(zdroj: vlastní)

Tabulka 11 Přehled hmotností namáčené lněné tkaniny ve vodných roztocích $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Koncentrace vodného roztoku	Číslo tkaniny	Původní hmotnost 6 ks tkaniny	Hmotnost 6 ks tkanin po	Hmotnost plniva v tkanině	Navýšení hmotnosti
20 hm. %	1	45 g	60,8 g	15,8 g	35,1 %
	2	45 g	63,4 g	18,4 g	40,9 %
11,7 hm. %	3	45 g	52,0 g	7,0 g	15,6 %
	4	45 g	51,8 g	6,8 g	15,1 %

(zdroj: vlastní)

11.2 Výroba semiproduktů bez příměsí retardantu v matrici

Po přípravě lněné tkaniny byly připraveny formy pro výrobu dvou desek pro případy s matricí bez příměsí práškového retardantu, přičemž pro každý ze systému se vyráběla jedna deska. Postup byl obdobný jako u výroby desky pro DMA. Po separaci skleněné desky třemi vrstvami separačního vosku se připravily pomocné materiály jako odtrhová tkanina, pásy, hadičky nebo vývěva. Následně došlo k zavakuování forem pro impregnaci epoxidovými pryskyřicemi.



Obrázek 49 Připravena forma pro impregnaci pryskyřicí

(zdroj: vlastní)

První systém epoxidové pryskyřice Cardolite® pro výrobu semiproduktů byl namíchán z epoxidové pryskyřice FormuLITE 2501A a vytvrzovacího činidla FormuLITE 2401B v hmotnostním mísicím poměru 100:31. Pro výrobu jedné desky se využilo 114,5 g pryskyřice 2501A a 35,496 g vytvrzovacího činidla. Při aplikaci systému skládajícího se z epoxidové pryskyřice FormuLITE 2502A a vytvrzovacího činidla 2401B bylo pro výrobu jedné desky použito 112,78 g pryskyřice a 37,218 g vytvrzovacího činidla.

11.3 Stanovení množství příměsi práškového retardantu v matrici pro výrobu semiproduktů

Z desky vyrobené pro DMA byla vyřezána destička o rozměrech 100 x 100 mm, která byla zvážena za účelem stanovení hmotnostního poměru matrice a výztuže ve výrobku. Údaje o hmotnosti 6 vrstev výztuže o rozměrech 100 x 100 mm jsou již známy (7,46 g). Po zvážení destičky se tak výpočtem stanovil hmotnostní podíl pryskyřice.

Tabulka 12 Stanovení podílu výztuže a matrice v destičce o rozměrech 100 x 100 mm

	Celkem	Výztuž	Matrice
Hmotnost	22,30 g	7,46 g	14,84 g
Podíl	-	33,45 %	66,55 %

(zdroj: vlastní)

Na základě stanovení podílů výztuže a matrice v destičce 100 x 100 mm byly vypočteny hodnoty podílů pro vyráběnou desku 200 x 300 mm. Díky předchozímu vážení je známo, že 6 ks tkaniny o těchto rozměrech váží 45 g. Vypočtené hodnoty vyjadřuje tabulka 13.

Tabulka 13 Stanovení podílu výztuže a matrice v destičce o rozměrech 200 x 300 mm

	Celkem	Výztuž	Matrice
Podíl	-	33,45 %	66,55 %
Hmotnost	134,52 g	45 g	89,52 g

(zdroj: vlastní)

Výchozími údaji pro výpočty množství plniva v matrici byly, kromě stanovení podílů matrice a výztuže, dosažené výsledky vážení namáčených tkanin, které znázorňuje tabulka 11. Na základě těchto dosažených výsledků se stanovila hodnota požadovaného

navýšení hmotnosti o 35 %, což odpovídá navýšení hmotnosti výztuže o 16 g. Hmotnost pryskyřice v desce 200 x 300 mm byla stanovena jako rozdíl celkové hmotnosti desky a hmotnosti příslušné namáčené tkaniny. Množství plniva v matrici je pak vyjádřeno jako rozdíl požadovaného navýšení (16 g) a skutečného navýšení hmotnosti namáčené výztuže. Rozdilem hmotnosti matrice a plniva pro navýšení o 35 % je pak vypočtena hmotnost čisté pryskyřice pro výrobu semiproductů. Výpočty pro vzorek č. 5 přísluší případu, kdy je výztuž bez retardantu a celková příměs retardantu je tak obsažena pouze v matrici.

Tabulka 14 Stanovení podílu výztuže a matrice v destičce o rozměrech 200 x 300 mm

Vzorek	Celková hmotnost desky	Výztuž + plnivo	Matrice	Plnivo pro navýšení hmotnosti o 35 %	Hmotnost čisté pryskyřice
1	134,52 g	60,8 g	73,72 g	0 g	73,72 g
2	134,52 g	63,4 g	71,12 g	0 g	71,12 g
3	134,52 g	52,0 g	82,52 g	9,0 g	73,52 g
4	134,52 g	51,8 g	82,72 g	9,2 g	73,52 g
5	134,52 g	45,0 g	89,52 g	16 g	73,52 g

(zdroj: vlastní)

Protože pro výrobu jedné desky o rozměrech 200 x 300 mm je zapotřebí 150 g matrice (směs pryskyřice a vytvrzovacího činidla), muselo se množství plniva v matrici pro navýšení hmotnosti o 35 % poměrově přepočítat právě pro použití tohoto množství pryskyřice.

Tabulka 15 Stanovení podílu výztuže a matrice v destičce o rozměrech 200 x 300 mm

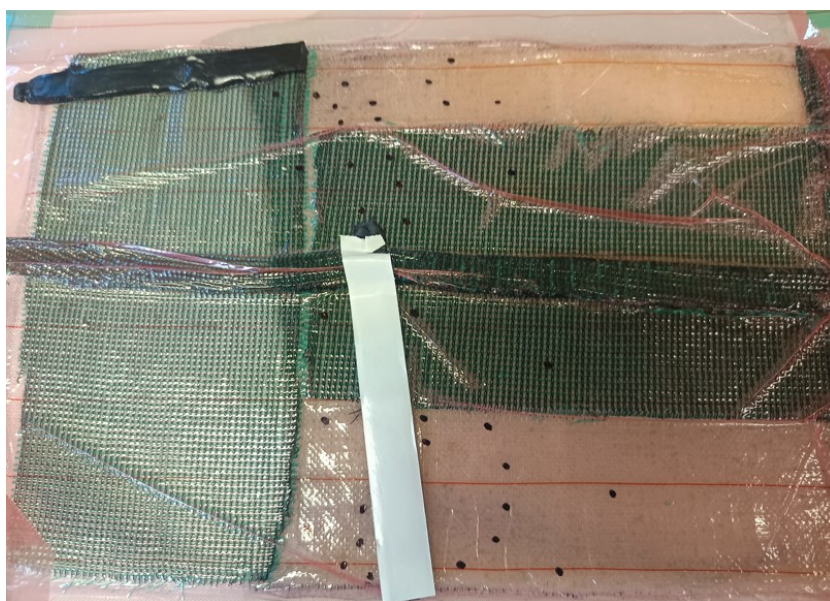
Vzorek	Celková hmotnost desky	Plnivo pro navýšení hmotnosti o 35 %	Hmotnost čisté pryskyřice	Pryskyřice pro výrobu	Množství plniva pro 150 g pryskyřice
1	134,52 g	0 g	73,72 g	150 g	0 g
2	134,52 g	0 g	71,12 g	150 g	0 g
3	134,52 g	9,0 g	73,52 g	150 g	18,36 g
4	134,52 g	9,2 g	73,52 g	150 g	18,77 g
5	134,52 g	16 g	73,52 g	150 g	32,65 g

(zdroj: vlastní)

11.4 Výroba semiproductů s příměsí retardantu v matrici

11.4.1 Systém s příměsí retardantu ve výztuži i matrici

Pro systém s matricí s příměsí práškového retardantu byla opět připravena forma pro výrobu vakuovou infuzí. Do systému skládajícího se z 112,78 g pryskyřice 2502A a 37,218 g vytvrzovacího činidla se přimíchalo 18,77 g práškového retardantu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Příměs práškového retardantu však zvýšila viskozitu systému epoxidové pryskyřice, proto nedocházelo k řádnému prosycení formy matricí. Pro zlepšení prosycení byla forma během infuze modifikována přidáním rozvodné rohože na vhodných místech. Tyto modifikace mírně zlepšily prosycení tkaniny pryskyřicí.

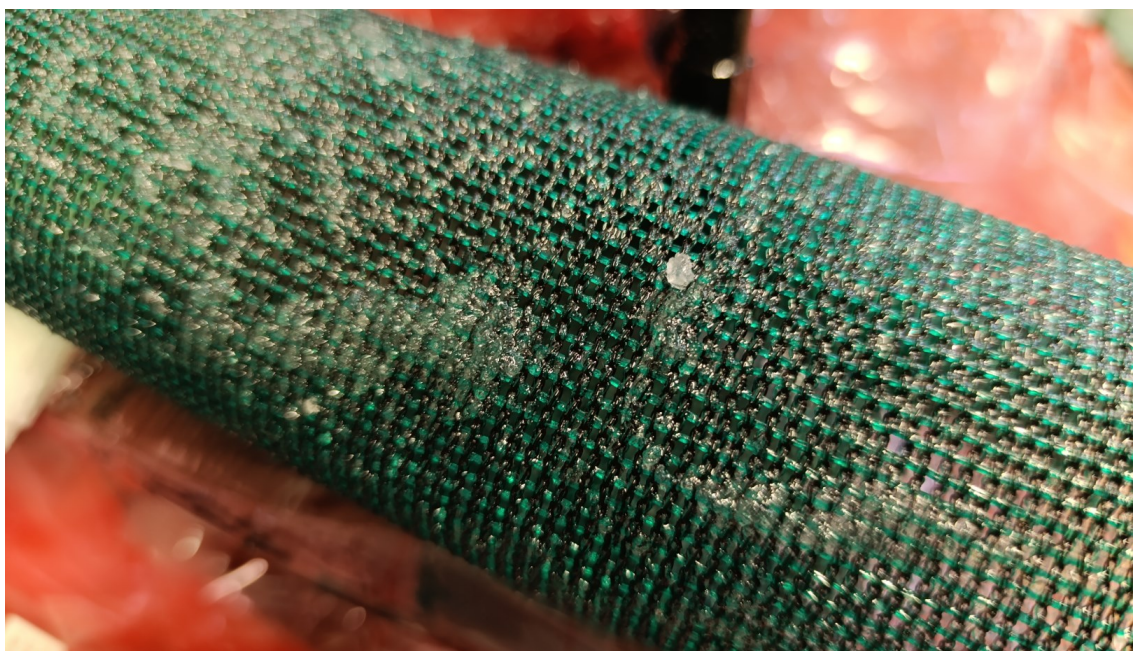


Obrázek 50 Modifikace při výrobě semiproductu s příměsí práškového retardantu v systému 2502A + 2401B vakuovou infuzí

(zdroj: vlastní)

Do systému skládajícího se z 114,5 g pryskyřice 2501A a 35,496 g vytvrzovacího činidla 2401B bylo přimícháno 18,36 g práškového retardantu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Systém pryskyřice 2501A a vytvrzovacího činidla 2401B vykazuje viskozitu o hodnotě 905 cPs, což je téměř dvakrát tolik co předchozí systém (480 cPs). Přidání práškového retardantu pak tuto viskozitu zvýšilo natolik, že nedošlo k řádnému prosycení formy pryskyřicí, a to ani přes úpravu formy během procesu infuze. Po odformování bylo zjištěno, že práškový retardant měl tendenci se z pryskyřice vylučovat a vysrážet. To bylo zřejmě důvodem velmi pomalého postupu prosycení systému. Nejvíce se krystaly retardantu usazovaly na rozvodné rohoži,

kteřá v tomto případě pracovala jako filtr pryskyřice. Usazování krystalů je patrné na obrázku 51.



Obrázek 51 Usazené částice práškového retardantu z pryskyřice

(zdroj: vlastní)

Ukázalo se tak, že pro takto viskózní plněné systémy není vakuová infuze vhodnou výrobní technologií. Proto byla pro výrobu semiproductů s příměsí práškového retardantu pouze v matrici vakuová infuze nahrazena technologií ručního prosycení epoxidovou pryskyřicí a následného zavakuování pro odstranění co největšího podílu vzduchu ze struktury.

11.4.2 Systém s příměsí retardantu pouze v matrici

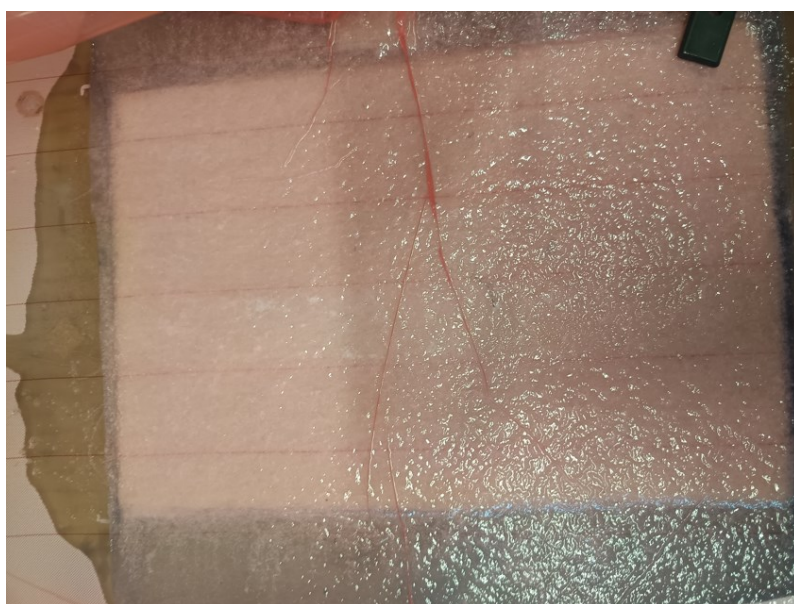
Naseparovaná skleněná deska se po obvodu oblepila těsnicí páskou. Do systému pryskyřice skládající se z 114,5 g epoxidové pryskyřice 2501A a 35,496 g vytvrzovacího činidla 2401B se přidalo 32,65 g práškového retardantu. Po důkladném promíchání směsi byla štětcem stejnosměrnými tahy nanесena první vrstva pryskyřice na skleněnou desku. Na tuto vrstvu se položila první vrstva výztuže a následně opětovně stejnosměrnými tahy štětce překryta další vrstvou pryskyřice. Tento postup byl opakován, dokud nebylo na formu vloženo všech 6 vrstev výztuže v podobě lněné tkaniny. Materiály uložené na povrch formy jsou zobrazeny na obrázku 52.



Obrázek 52 Výztuž ručně prosycená matricí 2501A+2401B s příměsí retardantu

(zdroj: vlastní)

Po dokončení ručního kladení a nanesení pryskyřice se celý systém překryl odtrhovou tkaninou a vakuovou folií a utěsněn pomocí již dříve nanesené těsnící pásky. Na jedné straně byl vytvořen otvor pro hadičku s vývěvou pro vytvoření vakua uvnitř formy. Po vytvoření vakua ve formě a ověření těsnosti celého systému byl tento vývod k vývěvě zaškrcen svorkou, vývěva odpojena a semiproduct se nechal vytvrdnout.



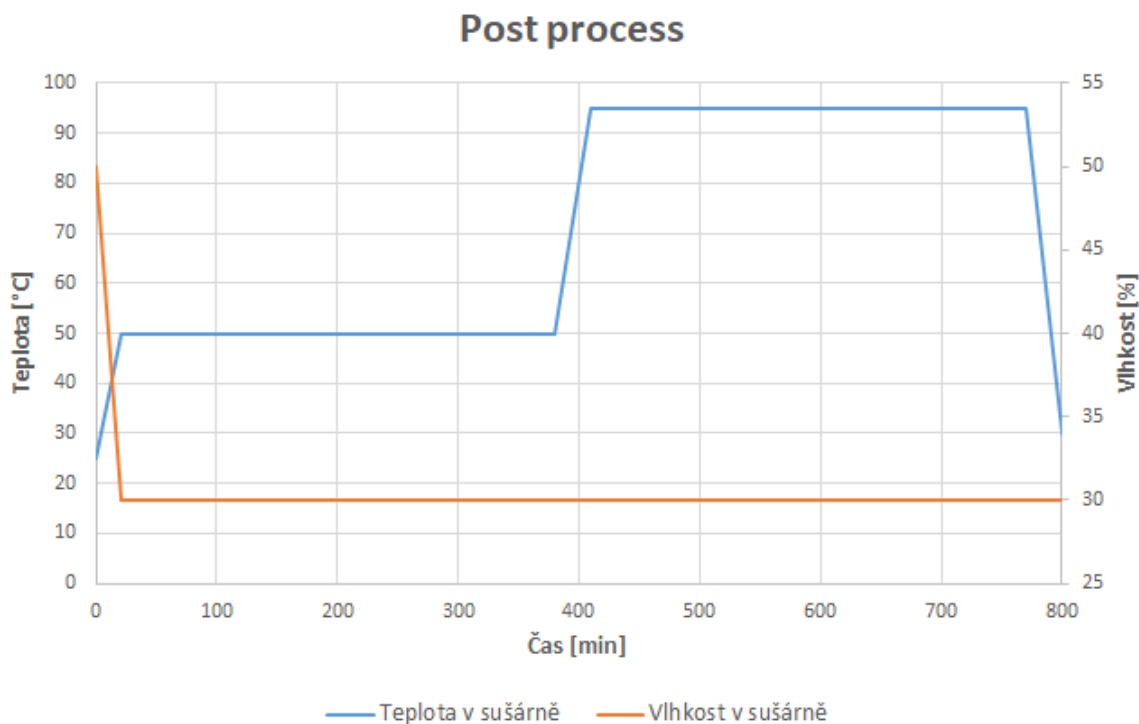
Obrázek 53 Výztuž ručně prosycená matricí 2502A+2401B s příměsí retardantu pod vakuem

(zdroj: vlastní)

Celý proces se poté zopakoval i pro druhý epoxidový systém obsahující 112,78 g pryskyřice 2502A, 37,218 g vytvrzovacího činidla 2401B a 32,645 g práškového retardantu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$.

11.5 Post process a příprava zkušebních těles

Všechny vyrobené semiprodukty se podrobily zesíťování v rámci post processu. Post proces probíhal za definovaných podmínek vycházejících z výsledků analýz DMA v sušárně a skládal se z pěti kroků. Prvním krokem byl ohřev pece na 50 °C při gradientu 2,5 a dosažení vlhkosti 30 % gradientem 1,5 během 20 minut. Vlhkost na úrovni 30 % byla udržována po dobu celého post processu. Druhým krokem byla výdrž na těchto podmínkách po dobu 6 hodin. Ve třetím kroku došlo k dalšímu ohřevu, tentokrát na 95 °C během 30 minut. Po tomto ohřevu následovala výdrž na této teplotě po dobu 6 hodin. V posledním kroku došlo během 30 minut k vychlazení pece na 30 °C pro vyjmutí vyrobených desek k dalšímu zpracování.



Obrázek 54 Grafické znázornění post processu

(zdroj: vlastní)

Po dokončení post processu byly z jednotlivých desek pomocí laseru vyřezány zkušební tělesa. Nejprve deska o rozměrech 100 x 100 mm pro zkoušku hořlavosti, následně pak jednotlivá zkušební tělesa pro zkoušky mechanických vlastností. Rozměry těchto těles jsou dány příslušným normalizovaným předpisem. Pro zkoušku rázové houževnatosti to jsou

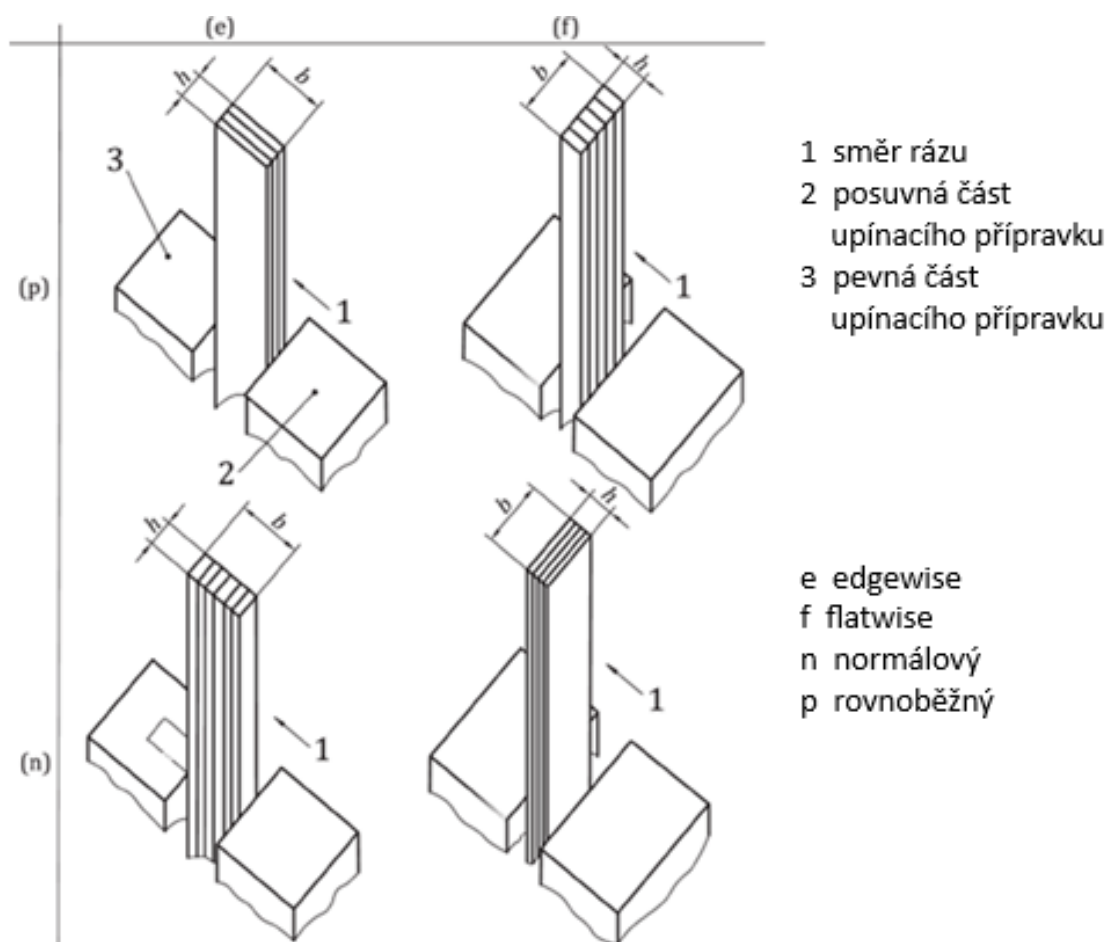
obdélníky 80 x 10 mm, pro zkoušku ohybem pak obdélníky 80 x 15 mm. Vyřezání všech zkušebních těles bylo provedeno pomocí CO2 laseru o výkonu 100 W v budově Centra polymerních systémů. Jednotlivá zkušební tělesa byla nakreslena a vyřezána pomocí řídicího systému LaserWork. Vyřezání proběhlo rychlostí 35 mm/s při 90 % výkonu stroje.

12 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Pro ověření vlivu příměsi práškového retardantu v kompozitu na mechanické vlastnosti byly vyrobené semiprodukty podrobeny dvěma zkouškám mechanických vlastností – zkoušce rázové houževnatosti Izod a zkoušce ohybem. Pro obě zkoušky bylo uvažováno s 10 ks zkušebních těles pro každý ze semiproduktů. Vzhledem k tomu, že u některých z vyráběných desek, zejména u těch s plnivem práškového retardantu v matrici, nedošlo k řádnému prosycení celé desky, a příslušné normy stanovují jako minimální počet zkušebních těles 5 ks, je u některých ze semiproduktů počet zkušebních těles nižší než 10.

12.1 Zkouška rázové houževnatosti Izod

12.1.1 Princip rázové zkoušky houževnatosti Izod



Obrázek 55 Schéma variant rázové zkoušky houževnatosti Izod

(zdroj: [87])

Zkušební těleso umístěné jako svislý vetknutý nosník je přeraženo úderem rázového kyvadla kdy přímka rázu prochází v dané vzdálenosti od místa upevnění tělesa. V případě zkušební tělesa opatřeného vrubem pak v dané vzdálenosti od osy vrubu. Tvary a rozměry těchto vrubů jsou dány normou ČSN ISO 180. Zkoušku lze provést dvěma způsoby – rázem na užší stranu (ráz edgewise) a rázem na širší stranu (ráz flatwise). Zkouška rázové houževnatosti sice není určena jako zdroj dat pro konstrukční výpočty, poskytuje však informace o typickém chování materiálu. V rámci tohoto experimentu byla zvolena metoda Izod edgewise. [87]

12.1.2 Popis provedení zkoušky Izod

Zkouška rázové houževnatosti Izod byla provedena na zkušebním stroji s kyvným ramenem s kladivem. Prvním krokem byla volba vhodného kladiva, a sice kladiva o rázové energii 2,75 J. Výsledky jednotlivých měření byly evidovány a ukládány pomocí softwarového řešení TestXpert III.

Před každým měřením se u zkušební tělesa změřila přesná šířka a tloušťka pomocí digitálního posuvného měřítka. Vzorek se následně upnul do připravených čelistí tak, aby úder kladiva směřoval do poloviny jeho délky. Po uzavření bezpečnostních dvířek bylo uvolněním dvou bezpečnostních pojistek spuštěno kladivo. To svým pohybem přerazilo zkušební těleso a dosažené výsledky (energie W v J spotřebovaná při přeražení zkušební tělesa a rázová houževnatost a_k vyjádřena v kJ/m^2) se byly zapsány do softwaru. Při zpětném kyvu kladiva bylo nutné jej zachytit do ruky a zavěsit do bezpečnostní polohy.

12.1.3 Výsledky jednotlivých měření rázové zkoušky houževnatosti Izod

V rámci experimentu jsou pro každý z obou epoxidových systémů testovány čtyři varianty:

- Namáčená tkanina ve 20 hmotnostních % roztoku retardantu (Varianta I a II).
- Namáčená tkanina v 11,7 hmotnostních % roztoku retardantu a příměs prášku do matrice (Varianta III a IV).
- Tkanina bez retardantu a příměs pouze do matrice (Varianta V a VI).
- Čistý systém bez příměsí (Varianta VII a VIII).

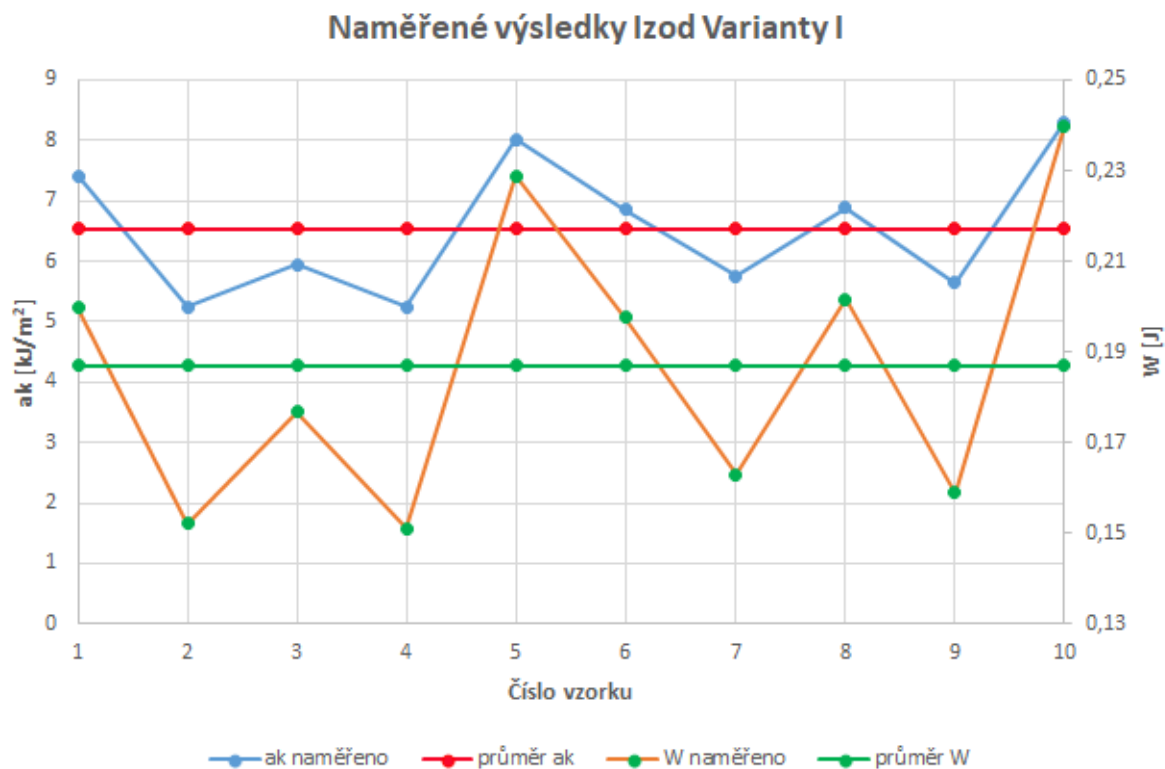
Číslování variant je zvoleno tak, že lichá čísla označují systémy na bázi pryskyřice 2501A, sudá čísla pak systémy na bázi pryskyřice 2502A.

Pro každou z variant byla v softwaru TestXpert III založena vlastní testovací série pro vyhodnocení. Dosažené výsledky znázorňují následující tabulky a grafy, které vyjadřují dosažené hodnoty jednotlivých zkušebních vzorků a celkové vyhodnocení za testovanou sérii obsahující průměrnou energii spotřebovanou k přeražení vzorků a průměrnou rázovou houževnatost. Tabulky obsahují také hodnoty směrodatné odchylky jednotlivých měření (S.D.). Přílohou číslo IV jsou výstupní soubory ze softwaru TestXpert III. U všech testovaných vzorků došlo k celkovému přeražení zkušebního tělesa kladivem.

Tabulka 16 Výsledky Izod pro 2501A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta I

Varianta I	b [mm]	h [mm]	W [J]	a_k [kJ/m ²]
Vzorek 1	9,84	2,74	0,199 697	7,406 725
Vzorek 2	9,81	2,96	0,152 111	5,238 400
Vzorek 3	9,79	3,04	0,176 805	5,940 725
Vzorek 4	9,79	2,94	0,151 127	5,250 634
Vzorek 5	9,8	2,91	0,228 788	8,022 598
Vzorek 6	9,77	2,95	0,197 700	6,859 467
Vzorek 7	9,77	2,9	0,162 952	5,751 311
Vzorek 8	9,79	2,99	0,201 695	6,890 362
Vzorek 9	9,79	2,88	0,159 005	5,639 440
Vzorek 10	9,79	2,95	0,239 888	8,306 219
Průměr	9,794	2,926	0,186 977	6,530 588
S.D.	0,020	0,080	0,031 632	1,127 513

(zdroj: vlastní)



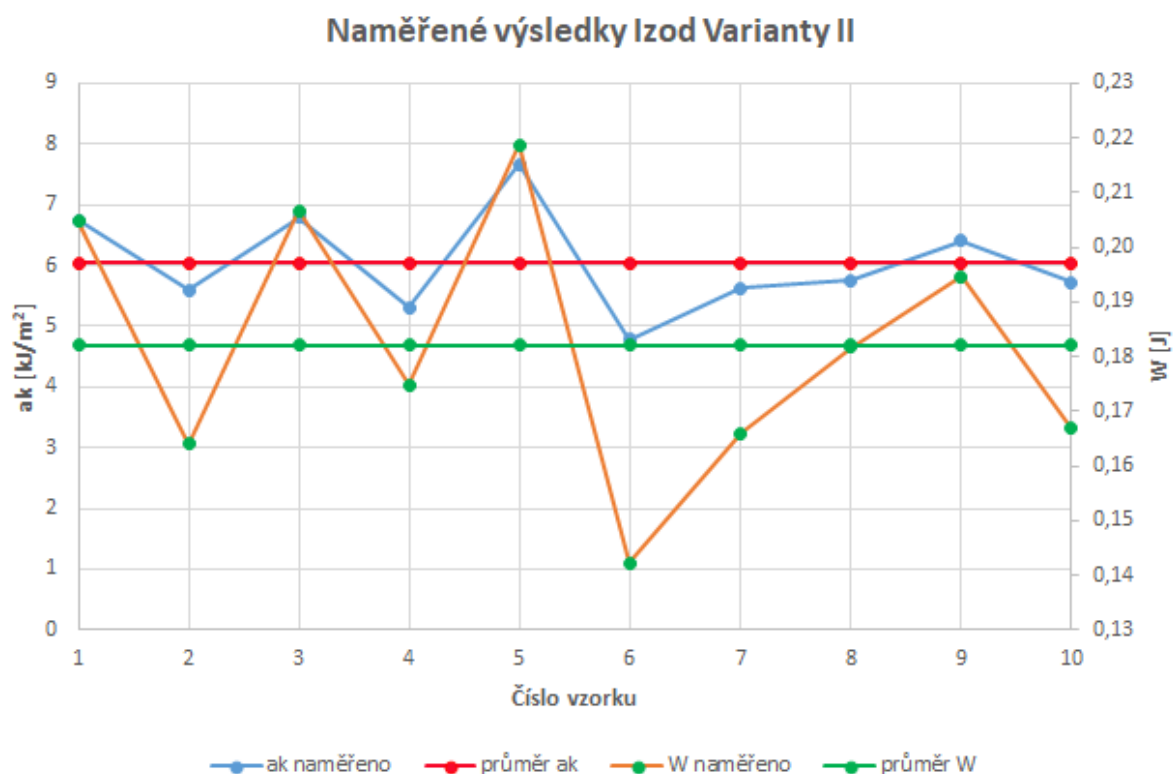
Obrázek 56 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu I

(zdroj: vlastní)

Tabulka 17 Výsledky Izod pro 2502A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta II

Varianta II	b [mm]	h [mm]	W [J]	ak [kJ/m ²]
Vzorek 1	9,80	3,10	0,204 695	6,737 820
Vzorek 2	9,82	2,98	0,163 939	5,602 161
Vzorek 3	9,81	3,10	0,206 696	6,796 758
Vzorek 4	9,79	3,36	0,174 823	5,314 662
Vzorek 5	9,83	2,90	0,218 729	7,672 810
Vzorek 6	9,79	3,04	0,142 289	4,780 945
Vzorek 7	9,80	3,01	0,165 915	5,624 630
Vzorek 8	9,80	3,22	0,181 768	5,760 174
Vzorek 9	9,80	3,10	0,194 707	6,409 049
Vzorek 10	9,82	2,97	0,166 904	5,722 663
Průměr	9,806	3,078	0,182 046	6,042 167
S.D.	0,013	0,133	0,023 751	0,850 910

(zdroj: vlastní)



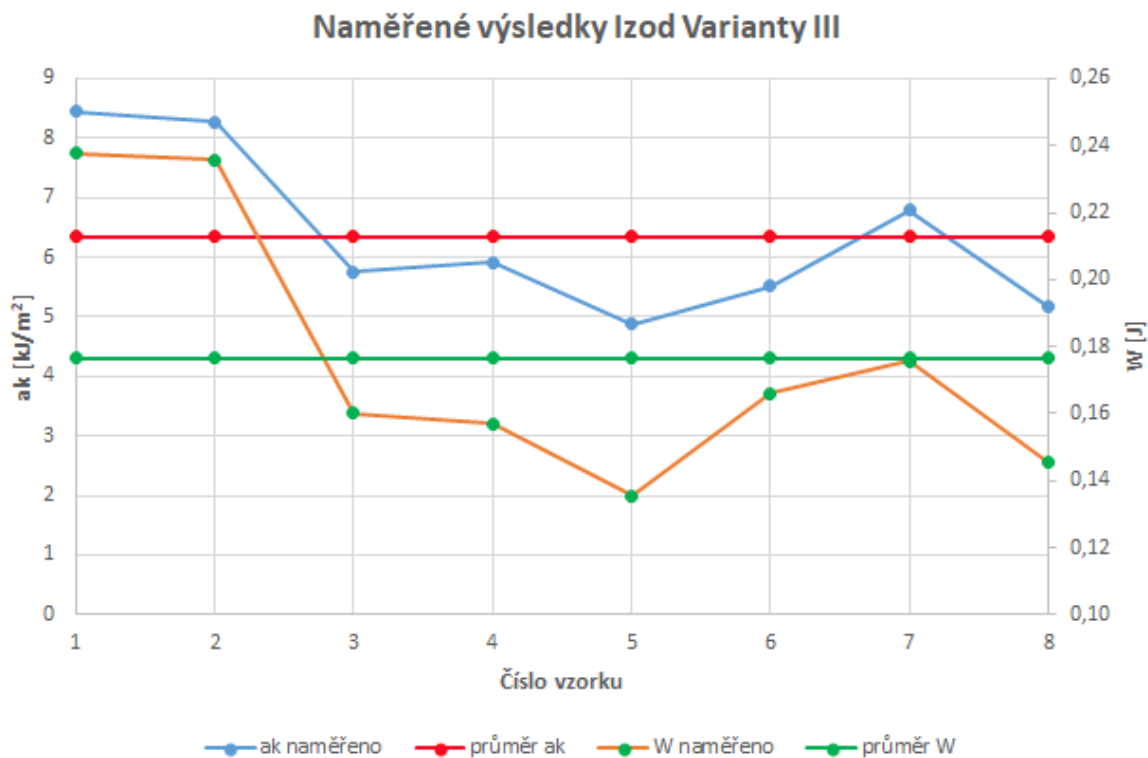
Obrázek 57 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu II

(zdroj: vlastní)

Tabulka 18 Výsledky Izod pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina namáčená v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta III

Varianta III	b [mm]	h [mm]	W [J]	ak [kJ/m²]
Vzorek 1	9,75	2,89	0,237 867	8,441 739
Vzorek 2	9,8	2,91	0,235 848	8,270 131
Vzorek 3	9,78	2,84	0,159 991	5,760 223
Vzorek 4	9,61	2,76	0,157 034	5,920 526
Vzorek 5	9,76	2,84	0,135 433	4,886 015
Vzorek 6	9,8	3,07	0,165 915	5,514 702
Vzorek 7	9,78	2,65	0,175 814	6,783 728
Vzorek 8	9,79	2,87	0,145 232	5,168 887
Průměr	9,759	2,854	0,176 642	6,343244
S.D.	0,063	0,121	0,039 126	1,363 730

(zdroj: vlastní)



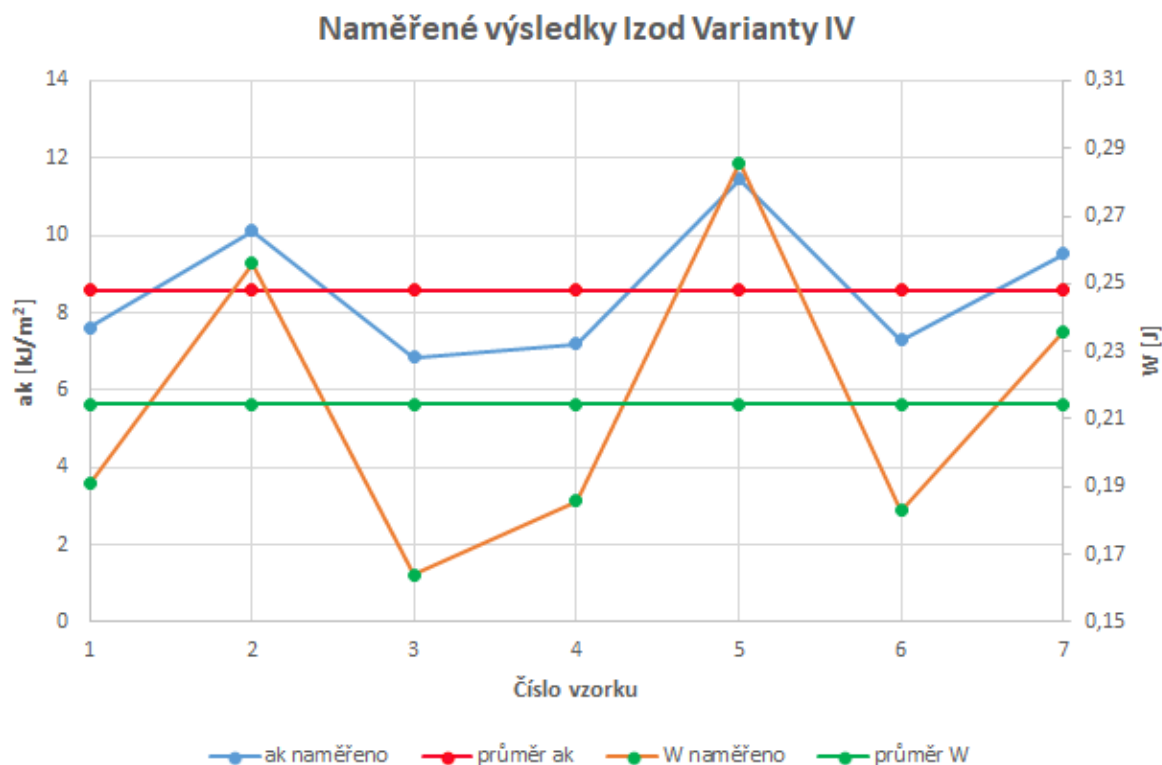
Obrázek 58 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu III

(zdroj: vlastní)

Tabulka 19 Výsledky Izod pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina namáčena v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta IV

Varianta IV	b [mm]	h [mm]	W [J]	ak [kJ/m²]
Vzorek 1	9,78	2,56	0,190 720	7,617 594
Vzorek 2	9,74	2,60	0,256 094	10,112 702
Vzorek 3	9,73	2,46	0,163 939	6,849 130
Vzorek 4	9,70	2,66	0,185 744	7,198 810
Vzorek 5	9,71	2,57	0,285 650	11,446 747
Vzorek 6	9,79	2,56	0,182 761	7,292 258
Vzorek 7	9,74	2,54	0,235 848	9,533 202
Průměr	9,741	2,564	0,214 394	8,578 635
S.D.	0,033	0,061	0,045 100	1,777 831

(zdroj: vlastní)



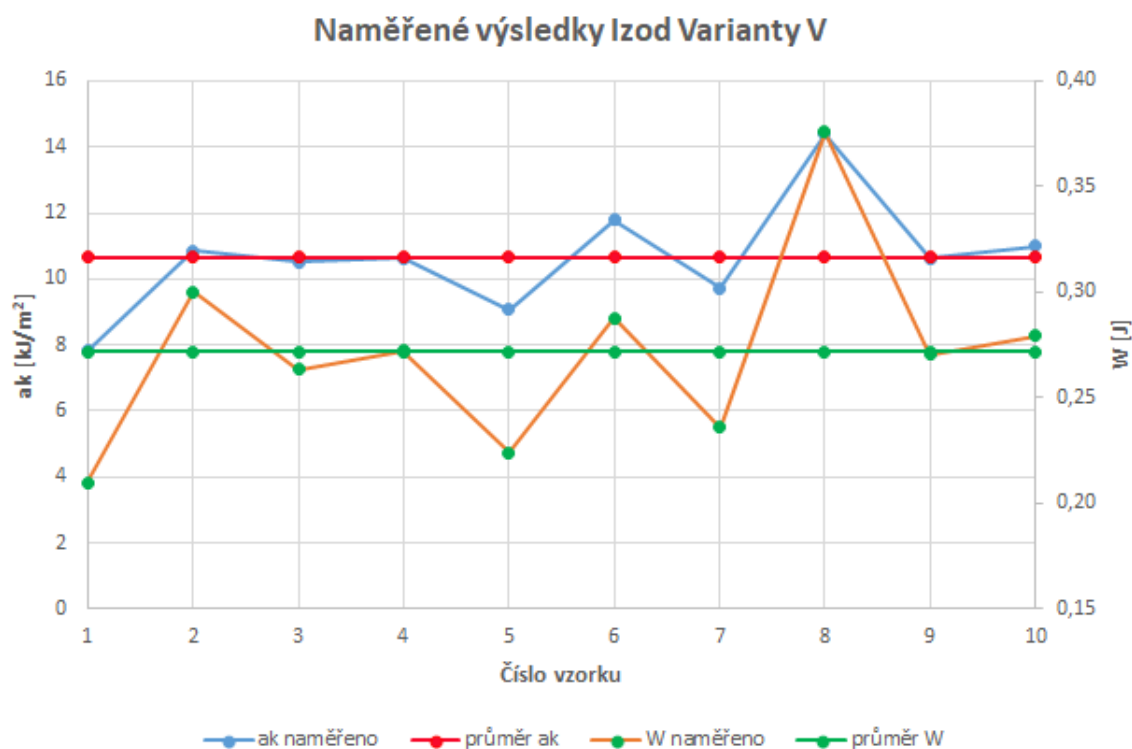
Obrázek 59 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu IV

(zdroj: vlastní)

Tabulka 20 Výsledky Izod pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta V

Varianta V	b [mm]	h [mm]	W [J]	ak [kJ/m²]
Vzorek 1	9,78	2,74	0,209 700	7,825 457
Vzorek 2	9,8	2,82	0,300 000	10,855 414
Vzorek 3	9,78	2,56	0,263 207	10,512 807
Vzorek 4	9,71	2,64	0,272 372	10,625 265
Vzorek 5	9,78	2,52	0,223 755	9,078 900
Vzorek 6	9,72	2,51	0,287 697	11,792 211
Vzorek 7	9,78	2,48	0,235 848	9,723 910
Vzorek 8	9,74	2,68	0,375 637	14,390 462
Vzorek 9	9,78	2,6	0,270 334	10,631 337
Vzorek 10	9,77	2,6	0,279 516	11,003 708
Průměr	9,764	2,615	0,271 807	10,643 947
S.D.	0,030	0,108	0,046 456	1,725 188

(zdroj: vlastní)



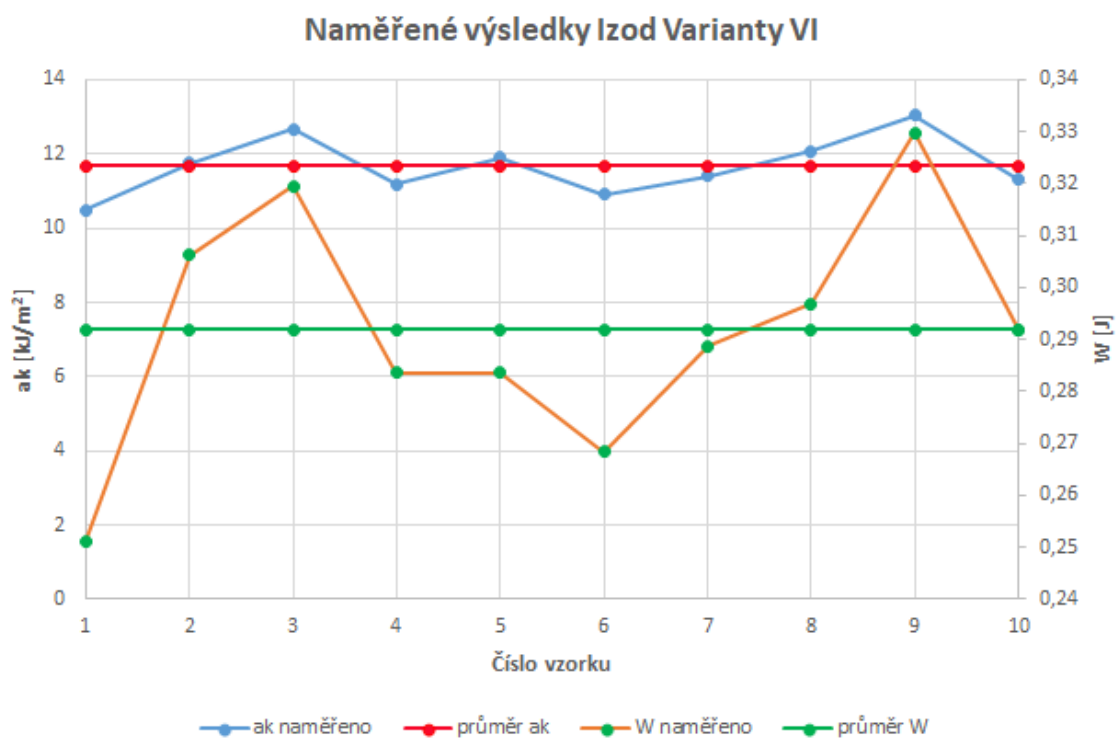
Obrázek 60 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu V

(zdroj: vlastní)

Tabulka 21 Výsledky Izod pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VI

Varianta VI	b [mm]	h [mm]	W [J]	ak [kJ/m²]
Vzorek 1	9,80	2,44	0,251 022	10,497 733
Vzorek 2	9,75	2,67	0,306 166	11,760 919
Vzorek 3	9,78	2,58	0,319 558	12,664 579
Vzorek 4	9,71	2,61	0,283 604	11,190 596
Vzorek 5	9,69	2,46	0,283 604	11,897 455
Vzorek 6	9,71	2,53	0,268 296	10,921 306
Vzorek 7	9,70	2,61	0,288 721	11,404 224
Vzorek 8	9,65	2,55	0,296 921	12,066 273
Vzorek 9	9,80	2,58	0,329 888	13,047 319
Vzorek 10	9,78	2,64	0,291 794	11,301 426
Průměr	9,737	2,567	0,291 957	11,675 183
S.D.	0,052	0,074	0,023 125	0,779 888

(zdroj: vlastní)



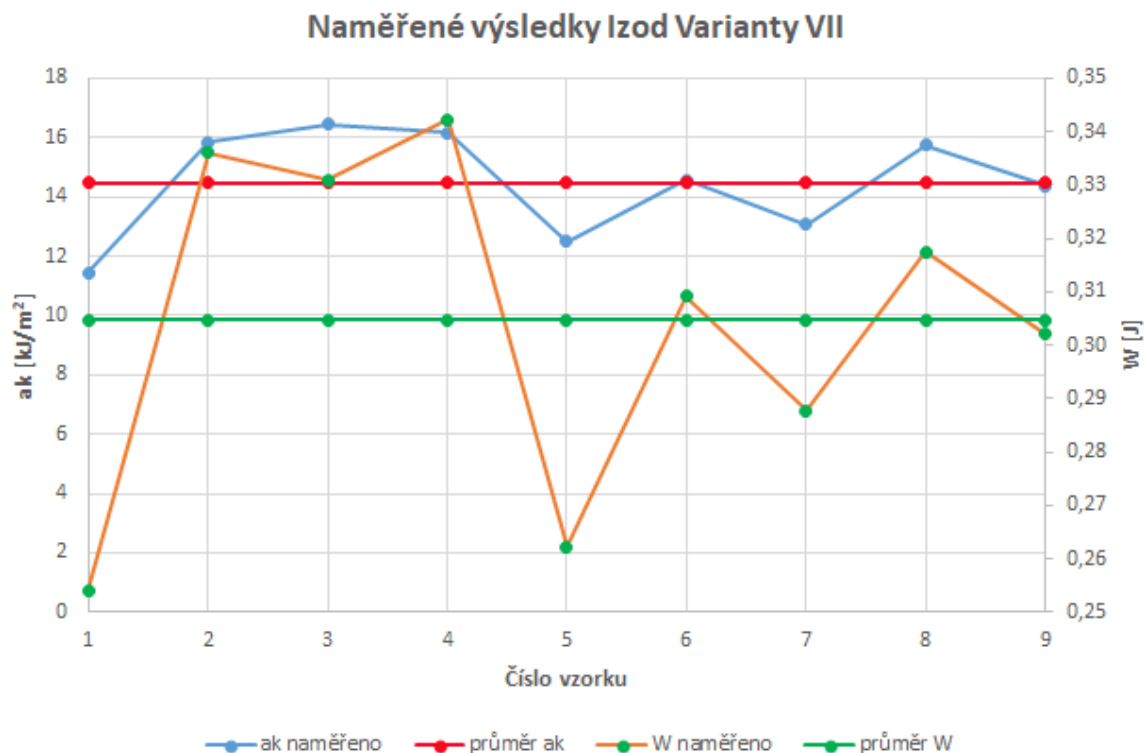
Obrázek 61 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu VI

(zdroj: vlastní)

Tabulka 22 Výsledky Izod pro 2501A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VII

Varianta VII	b [mm]	h [mm]	W [J]	ak [kJ/m ²]
Vzorek 1	9,78	2,27	0,254 064	11,444 029
Vzorek 2	9,78	2,17	0,336 099	15,836 841
Vzorek 3	9,71	2,07	0,330 923	16,464 071
Vzorek 4	9,80	2,16	0,342 318	16,171 507
Vzorek 5	9,75	2,15	0,262 190	12,507 576
Vzorek 6	9,74	2,18	0,309 253	14,564 578
Vzorek 7	9,77	2,25	0,287 697	13,087 544
Vzorek 8	9,69	2,08	0,317 495	15,752 492
Vzorek 9	9,78	2,15	0,302 054	14,365 076
Průměr	9,756	2,164	0,304 677	14,465 968
S.D.	0,036	0,066	0,031 505	1,779 153

(zdroj: vlastní)



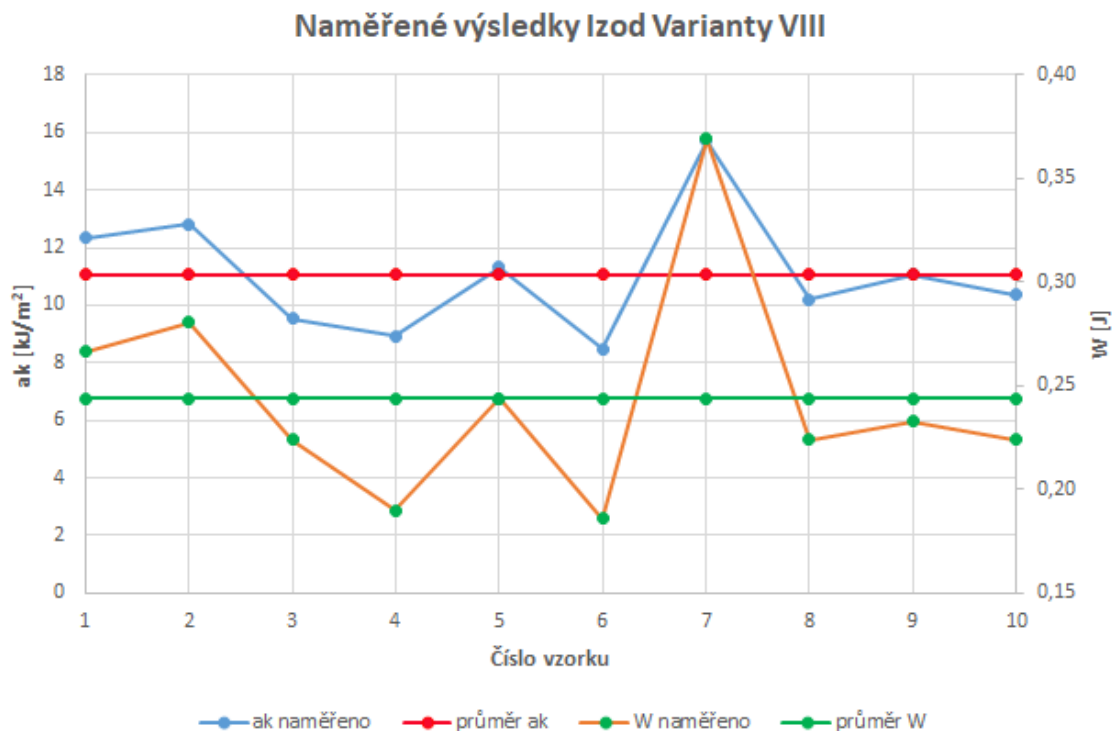
Obrázek 62 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu VII

(zdroj: vlastní)

Tabulka 23 Výsledky Izod pro 2502A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VIII

Varianta VIII	b [mm]	h [mm]	W [J]	ak [kJ/m ²]
Vzorek 1	9,81	2,20	0,266 260	12,337 116
Vzorek 2	9,81	2,23	0,280 538	12,823 825
Vzorek 3	9,78	2,40	0,223 755	9,532 845
Vzorek 4	9,83	2,16	0,189 724	8,935 433
Vzorek 5	9,80	2,20	0,243 933	11,314 123
Vzorek 6	9,81	2,23	0,185 744	8,490 635
Vzorek 7	9,76	2,41	0,369 371	15,703 491
Vzorek 8	9,80	2,24	0,223 755	10,192 919
Vzorek 9	9,79	2,15	0,232 821	11,061 145
Vzorek 10	9,80	2,20	0,223 755	10,378 244
Průměr	9,799	2,242	0,243 965	11,076 978
S.D.	0,019	0,091	0,052 960	2,135 157

(zdroj: vlastní)



Obrázek 63 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu VIII

(zdroj: vlastní)

12.1.4 Vyhodnocení výsledků rázové zkoušky houževnatosti Izod

Naměřené hodnoty rázové houževnatosti pro systémy pryskyřice 2501A jsou shrnuty v tabulce 24 a graficky vyjádřeny, včetně směrodatných odchylek, obrázkem 64, přičemž označení jednotlivých materiálových variant tohoto systému je následující:

- **Varianta I** – namáčená tkanina ve 20 hmotnostních % roztoku retardantu.
- **Varianta III** – namáčená tkanina v 11,7 hmotnostních % roztoku retardantu a příměs prášku do matrice.
- **Varianta V** – tkanina bez retardantu a příměs pouze do matrice.
- **Varianta VII** – čistý systém bez příměsí.

Z výsledků je patrné, že nejvyšší rázovou houževnatost vykazuje systém bez příměsí retardantu (varianta VII) vyrobený vakuovou infuzí. Pokud je práškový retardant přidán jako plnivo do matrice (varianta V), houževnatost poklesne přibližně o čtvrtinu. Tento výsledek však může být ovlivněn odlišnou technologií výroby (ruční prosycení). Tkanina namáčená v retardantu pak v systému pryskyřice 2501A vykazuje výrazné zhoršení rázové houževnatosti oproti systému bez příměsí, a to téměř o 55 %. Zda je příměs retardantu pouze

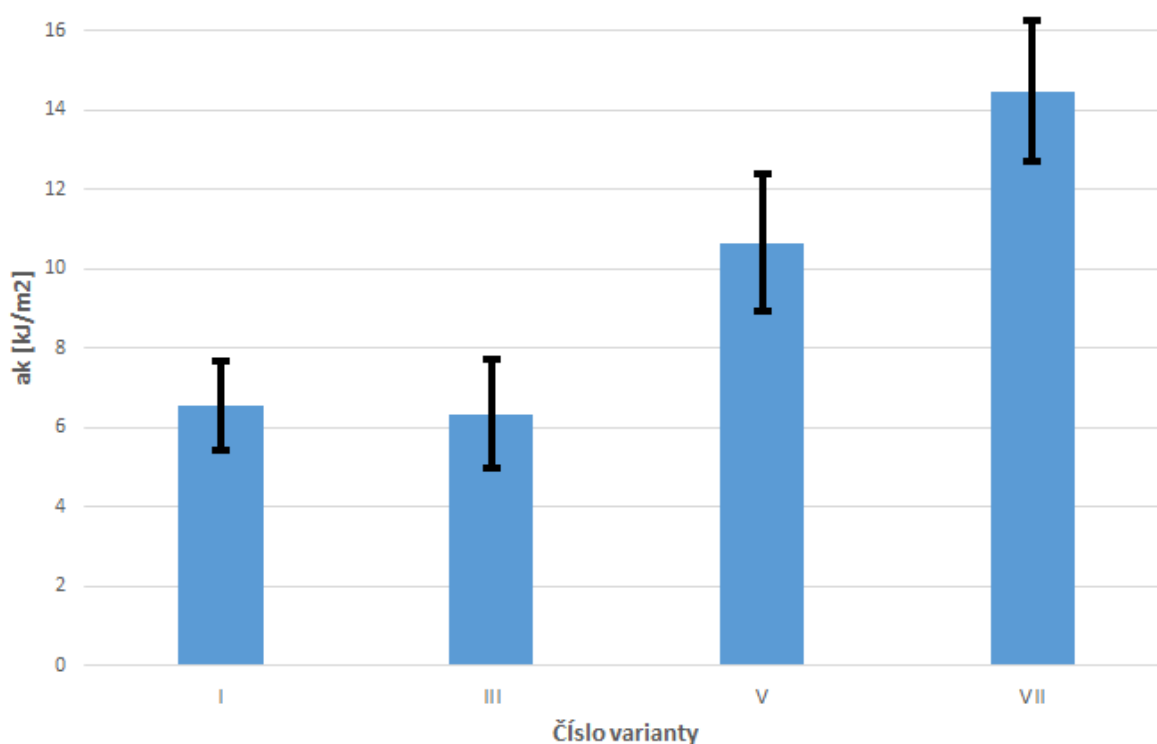
ve výztuži nebo výztuži i matrici pak nemá, dle dosažených výsledků, na rázovou houževnatost výraznější vliv.

Tabulka 24 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti pro systém pryskyřice 2501A

	a_k [kJ/m ²]	S.D.	Výrobní technologie semiprojektu
Varianta I	6,530 588	1,127 513	Vakuová infuze
Varianta III	6,343 244	1,363 730	Vakuová infuze
Varianta V	10,643 947	1,725 188	Ruční prosycení
Varianta VII	14,465 968	1,779 153	Vakuová infuze

(zdroj: vlastní)

Rázová houževnatost pro pryskyřici 2501A



Obrázek 64 Grafické vyjádření průměrných hodnot rázové houževnatosti pro varianty systémů s pryskyřicí 2501A

(zdroj: vlastní)

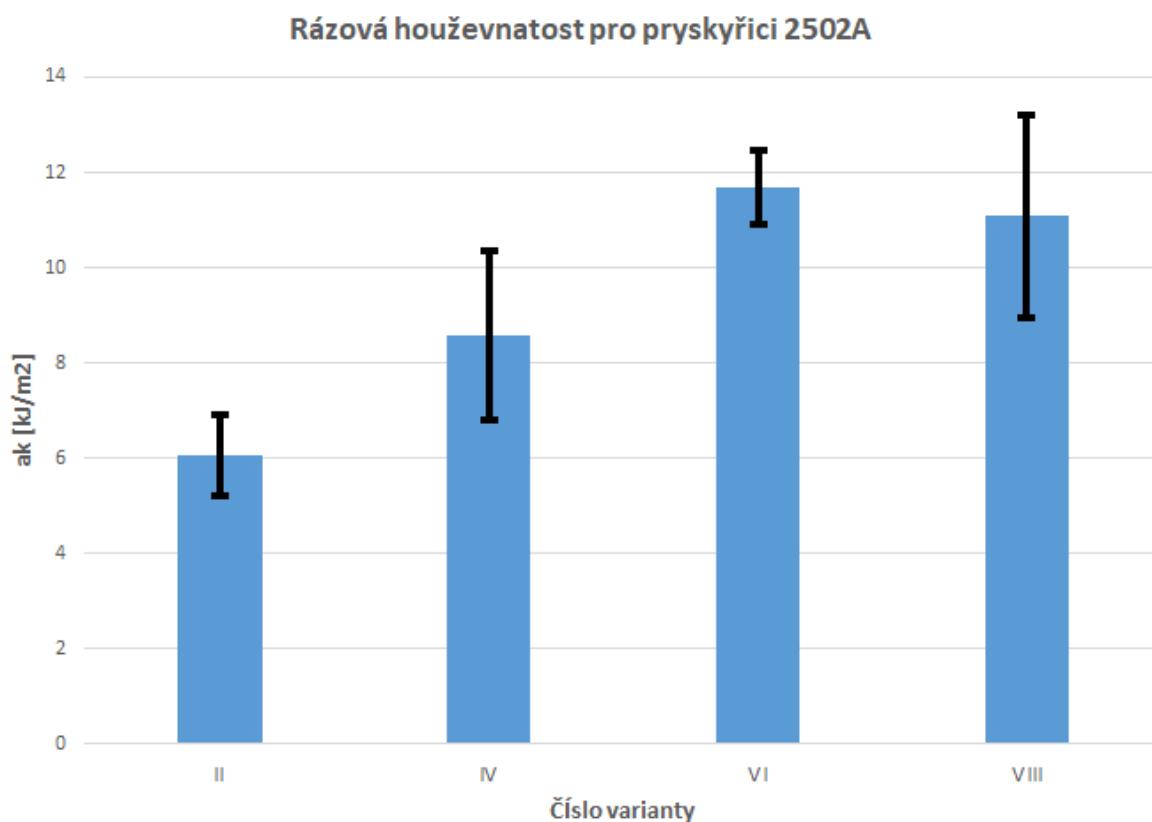
Dosažené výsledky zkoušky Izod pro systémy epoxidové pryskyřice 2502A jsou shrnuty v tabulce 25 a graficky vyjádřeny, včetně směrodatných odchylek, na obrázku 65, kde:

- **Varianta II** – namáčená tkanina ve 20 hmotnostních % roztoku retardantu.
- **Varianta IV** – namáčená tkanina v 11,7 hmotnostních % roztoku retardantu a příměs prášku do matrice.
- **Varianta VI** – tkanina bez retardantu a příměs pouze do matrice.
- **Varianta VIII** – čistý systém bez příměsí.

Tabulka 25 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti pro systém pryskyřice 2502A

	a_k [kJ/m ²]	S.D.	Výrobní technologie semiprojektu
Varianta II	6,042 167	0,850 910	Vakuová infuze
Varianta IV	8,578 635	1,777 831	Vakuová infuze
Varianta VI	11,675 183	0,779 888	Ruční prosycení
Varianta VIII	11,076 978	2,135 157	Vakuová infuze

(zdroj: vlastní)



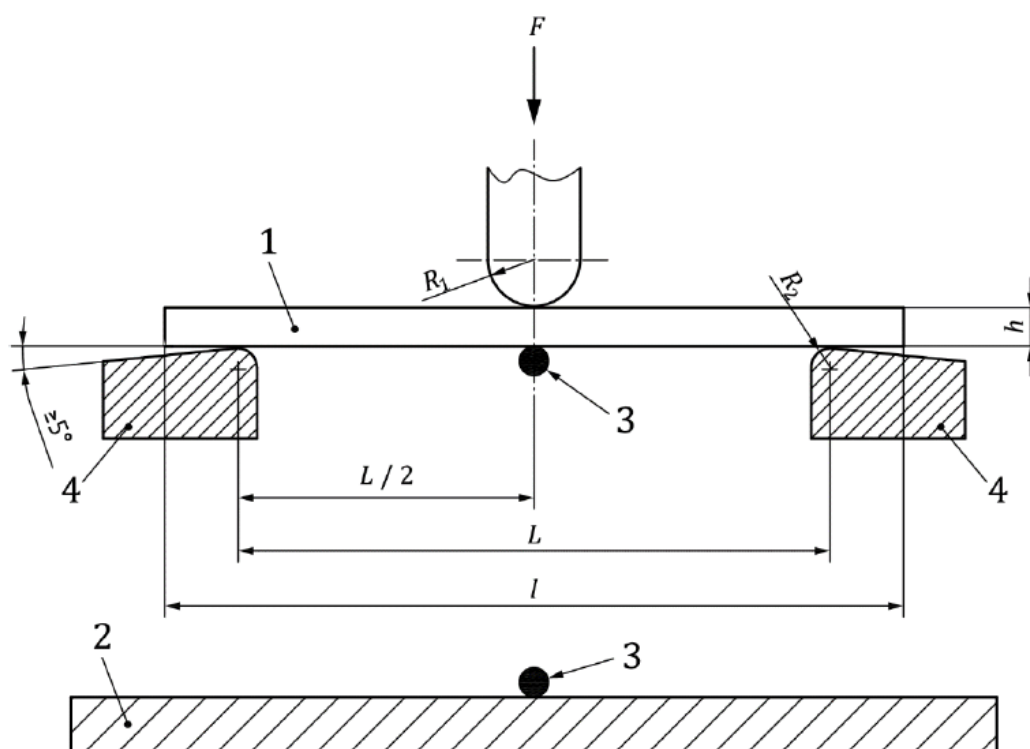
Obrázek 65 Grafické vyjádření průměrných hodnot rázové houževnatosti pro varianty systémů s pryskyřicí 2502A

(zdroj: vlastní)

Opět se ukázalo, že u systému bez příměsí retardantu (varianta VIII) je rázová houževnatost poměrně vysoká. Příměs retardantu v matrici (varianta VI) ji sice ještě dokázala navýšit, opět je však nutno vzít v potaz odlišnou výrobní technologii. Namáčení tkaniny ve 20 hmotnostních % roztoku retardantu v demineralizované vodě (varianta II) pak vykazuje nejnížší hodnoty rázové houževnatosti. U systému s příměsí retardantu ve výztuži i matrici (varianta IV) je pak houževnatost oproti systému bez příměsí nižší přibližně o 22 %.

12.2 Zkouška ohybem

12.2.1 Princip zkoušky ohybem



Legenda

- 1 zkušební těleso
- 2 podpěrná základová deska
- 3 umístění deflektometru
- 4 podpěry
- R_1 poloměr zatěžovacího trnu

- h tloušťka zkušebního tělesa
- F použitá síla
- l délka zkušebního tělesa
- L rozpětí podpěr
- R_2 poloměr podpěr

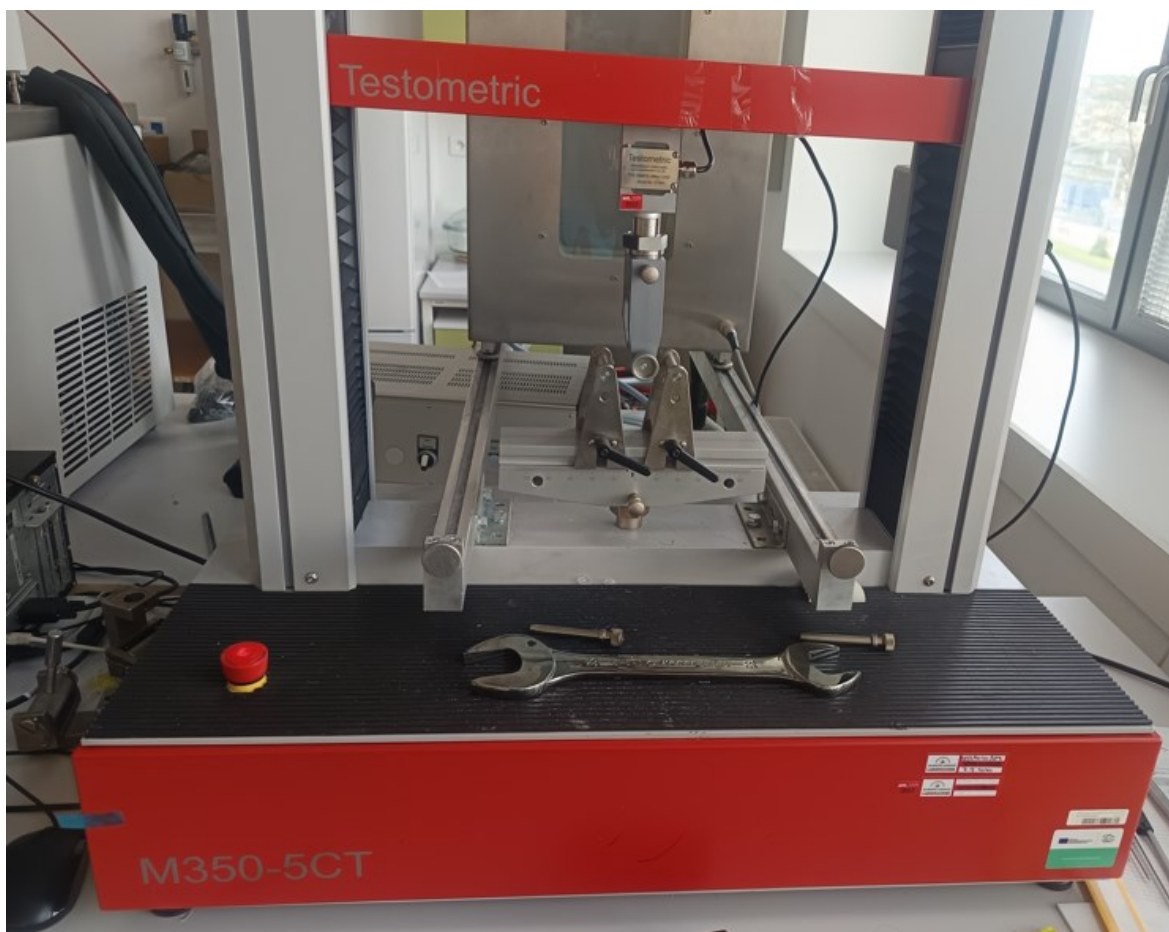
Obrázek 66 Schéma zkoušky v ohybu

(zdroj: [87])

Zkouška ohybem se provádí na univerzálních zkušebních strojích vybavenými čelistmi pro ohyb. Jsou rozeznávány dva typy této zkoušky – 3 bodová zkouška ohybem, kdy je

zkušební tyč uložena na dvou podpěrách a zatěžována jedním trnem, a 4 bodová zkouška ohybem, kdy je zkušební tyč uložena na dvou podpěrách a zatěžována dvěma trny. Zkušební tyč uložena na podpěrách je konstantní rychlostí prohýbána trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr. Napětí v průřezu je rozděleno nerovnoměrně, tj. od nulové hodnoty v neutrální ose roste do maxima v povrchových vláknech. Vyhodnocení zkoušky se provádí alespoň na 5 zkušebních vzorcích. Pro kompozitní materiály s vlákny delší než 7,5 mm je metodika zkoušky dána normou ČSN EN ISO 14125, přičemž geometrie zkoušky se volí tak, aby se omezila smyková deformace, a tedy i vyloučilo porušení v důsledku mezilaminárního smyku. [85; 86; 87; 90]

12.2.2 Popis provedení zkoušky ohybem



Obrázek 67 Zkušební stroj Testometric M350-5CT

(zdroj: vlastní)

Pro experiment byla zvolena 3 bodová zkouška ohybem. Zkouška byla prováděna na stroji Testometric M350-5CT, který se nachází v budově Centra polymerních systémů UTB Zlín. Prvním krokem byla montáž přípravků pro provádění 3 bodové zkoušky ohybem v podobě zatěžovacího trnu a podpěr. Rozteč podpěr byla nastavena v souladu s normou, tedy na hodnotu 64 mm. Zkušební stroj je ovládán pomocí softwaru Test Analysis 5.0.30. V tomto softwaru bylo potřeba nastavit parametry zkoušky. Prvním parametrem byla rychlost zátěže, která byla stanovena na 10 mm/min. Po nastavení nulového bodu zatěžovacího trnu byla také nastavena hodnota maximálního pohybu trnu směrem dolů, a to na 20 mm.

Systém provádění zkoušky byl obdobný jako u zkoušky rázové houževnatosti Izod, tedy samostatná série pro všech 8 připravených materiálových variant. U zkušebního tělesa se změřila digitálním posuvným měřítkem šířka a tloušťka a hodnoty se zapsaly do softwaru. Zkušební těleso se následně položilo na připravené podpěry tak, aby zatěžovací trn působil v jeho středu. V řídicím systému se následně zvolilo tlačítko pro zahájení pohybu zatěžovacího trnu směrem dolů. Trn svým pohybem působil zatížení na zkušební těleso tak dlouho, dokud nedošlo k porušení tělesa. Dosahované hodnoty zatěžující síly v N a průhybu tělesa v mm byly průběžně přenášeny do softwaru. Po porušení zkušebního tělesa došlo automaticky k odlehčení zatížení a pohybu zatěžovacího trnu směrem vzhůru do nulové polohy. Po provedení zkoušky u všech vzorků dané série se v softwaru nastavila nová série.

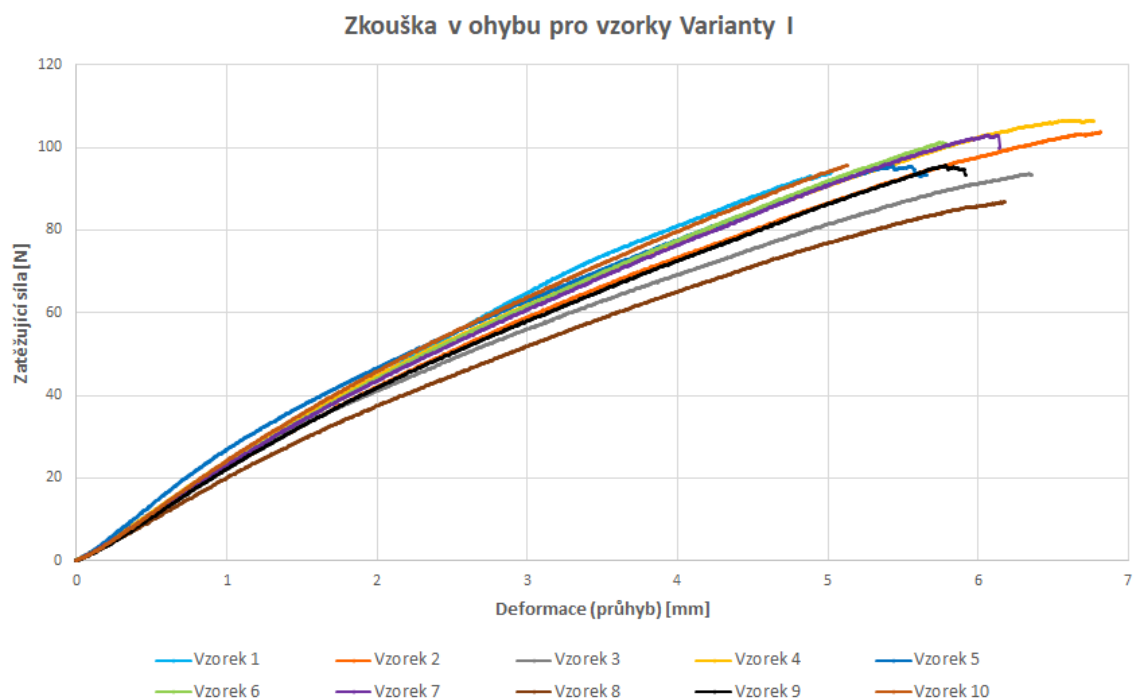
12.2.3 Výsledky jednotlivých měření zkoušky ohybem

Na obrázcích 68 až 75 jsou vyneseny průběhy zatěžující síly v poměru k průhybu jednotlivých zkušebních těles. Tabulky 26 až 33 pak vyjadřují, kromě naměřených šířek a tloušťek zkušebních těles, parametry dosažené provedenými zkouškami, jako jsou modul pružnosti v ohybu v MPa, zatěžující napětí před porušením zkušebního tělesa v MPa, hodnotu síly působící v momentě porušení zkušebního tělesa a hodnotu deformace (průhybu) zkušebního tělesa v momentě jeho porušení v mm. V tabulkách jsou zaznamenány také průměry všech těchto parametrů v dané zkušební sérii včetně směrodatné odchylky (S.D.). Přílohou číslo V této diplomové práce jsou výstupní soubory ze softwaru Test Analysis 5.0.30.

Tabulka 26 Výsledky zkoušky ohybu pro 2501A bez retardantu, tkanina namáčená ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta I

Varianta I	b [mm]	h [mm]	Modul v ohybu [MPa]	Nejvyšší napětí [MPa]	Nejvyšší síla [N]	Nejvyšší deformace [mm]
Vzorek 1	14,86	2,94	3 847,668	70,167	93,880	5,020
Vzorek 2	14,84	2,85	4 078,44	82,534	103,630	6,816
Vzorek 3	14,86	2,84	4 545,01	74,915	93,530	6,334
Vzorek 4	14,85	2,86	4 614,065	84,163	106,490	6,641
Vzorek 5	14,81	2,97	4 692,431	70,061	95,340	5,436
Vzorek 6	14,81	2,80	4 376,803	83,614	101,130	5,751
Vzorek 7	14,80	2,89	4 315,609	79,915	102,900	6,072
Vzorek 8	14,85	2,83	3 869,374	69,967	86,680	6,174
Vzorek 9	14,86	2,85	4 055,126	75,989	95,540	5,780
Vzorek 10	14,84	2,90	4 231,368	73,544	95,610	5,125
Průměr	14,84	2,87	4 262,589	76,487	97,473	5,915
S.D.	0,02	0,05	299,745	5,707	5,951	0,606

(zdroj: vlastní)



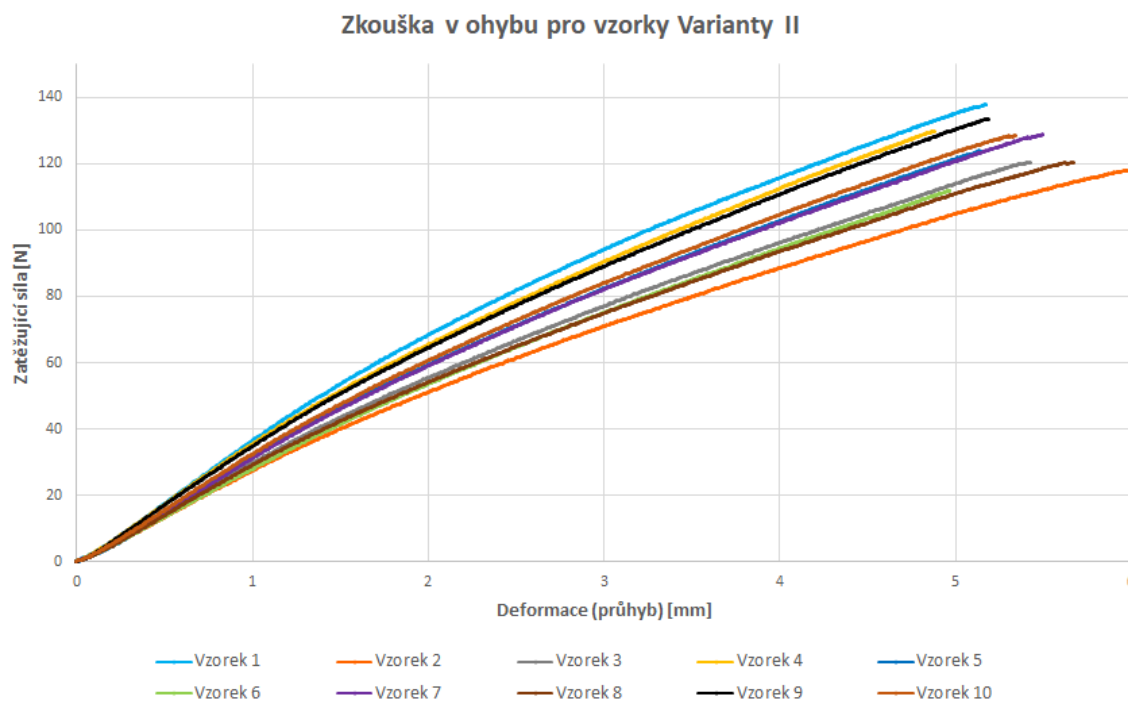
Obrázek 68 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty I

(zdroj: vlastní)

Tabulka 27 Výsledky zkoušky ohybu pro 2502A bez retardantu, tkanina namáčená ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta II

Varianta II	b [mm]	h [mm]	Modul v ohybu [MPa]	Nejvyšší napětí [MPa]	Nejvyšší síla [N]	Nejvyšší deformace [mm]
Vzorek 1	14,82	3,22	4 717,676	86,067	137,760	5,174
Vzorek 2	14,85	3,00	4 416,139	84,716	117,940	5,971
Vzorek 3	14,83	3,12	4 303,461	80,092	120,440	5,422
Vzorek 4	14,85	3,22	4 697,651	80,892	129,740	4,876
Vzorek 5	14,86	3,09	4 323,196	83,764	123,800	5,136
Vzorek 6	14,83	3,00	4 584,832	80,493	111,910	4,965
Vzorek 7	14,85	2,99	4 844,815	93,187	128,870	5,498
Vzorek 8	14,85	3,02	4 728,237	85,263	120,290	5,652
Vzorek 9	14,84	3,23	4 718,166	82,821	133,570	5,185
Vzorek 10	14,85	3,03	5 135,776	90,362	128,330	5,332
Průměr	14,84	3,09	4 646,995	84,766	125,265	5,321
S.D.	0,01	0,10	253,265	4,270	7,815	0,329

(zdroj: vlastní)



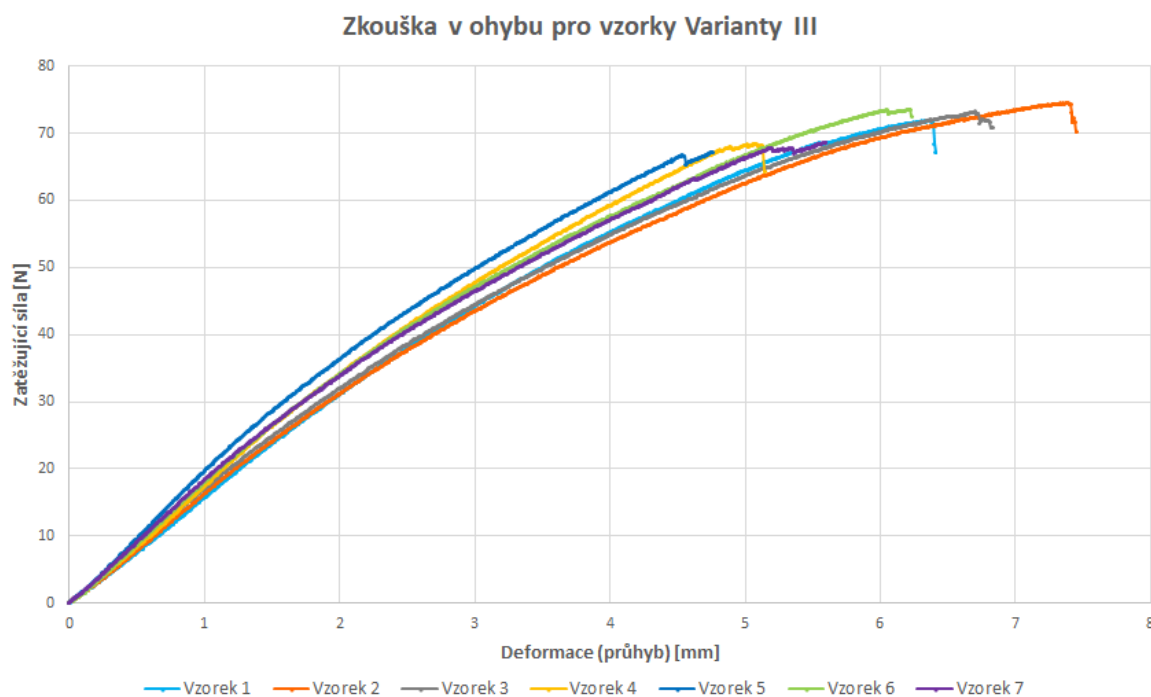
Obrázek 69 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty II

(zdroj: vlastní)

Tabulka 28 Výsledky zkoušky v ohybu pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina namáčená v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta III

Varianta III	b [mm]	h [mm]	Modul v ohybu [MPa]	Nejvyšší napětí [MPa]	Nejvyšší síla [N]	Nejvyšší deformace [mm]
Vzorek 1	14,85	2,84	2 818,193	57,620	71,890	6,345
Vzorek 2	14,79	2,76	3 239,481	63,464	74,480	7,328
Vzorek 3	14,81	2,88	3 127,973	57,214	73,210	6,702
Vzorek 4	14,79	3,03	2 802,556	48,401	68,460	5,074
Vzorek 5	14,77	2,89	3 599,785	52,311	67,220	4,756
Vzorek 6	14,84	2,93	3 253,658	55,437	73,570	6,221
Vzorek 7	14,80	2,78	3 858,857	57,602	68,630	5,595
Průměr	14,81	2,87	3 242,929	56,007	71,066	6,003
S.D.	0,03	0,09	386,088	4,726	2,907	0,912

(zdroj: vlastní)



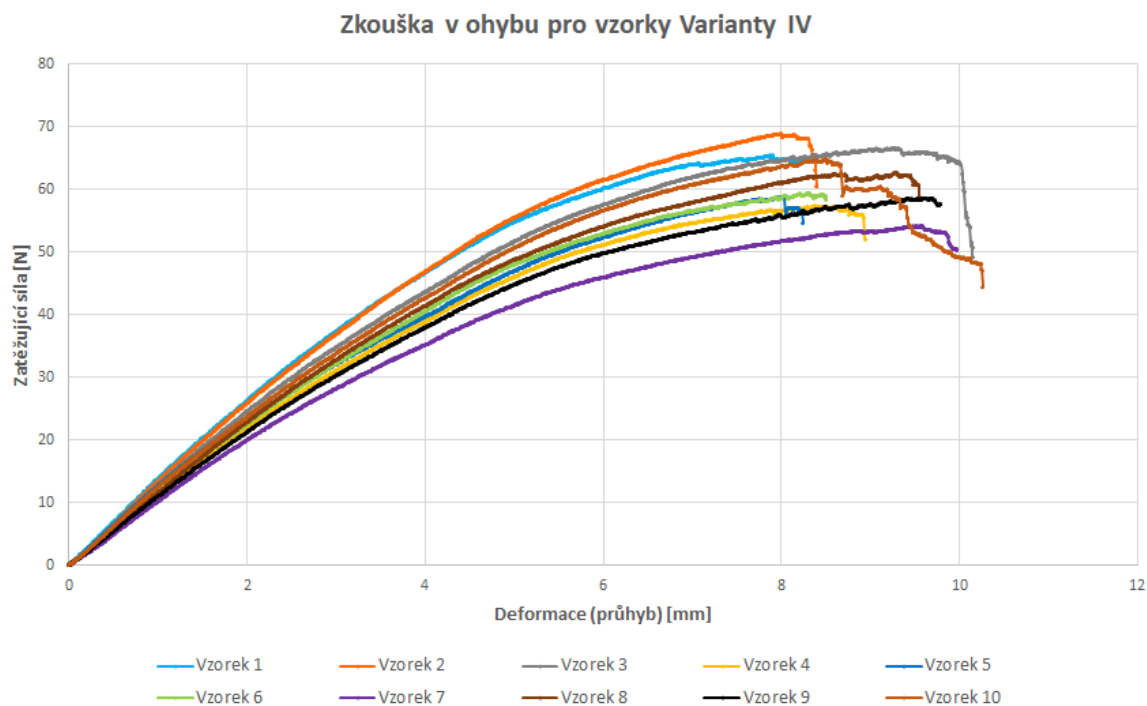
Obrázek 70 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty III

(zdroj: vlastní)

Tabulka 29 Výsledky zkoušky v ohybu pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina namáčená v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta IV

Varianta IV	b [mm]	h [mm]	Modul v ohybu [MPa]	Nejvyšší napětí [MPa]	Nejvyšší síla [N]	Nejvyšší deformace [mm]
Vzorek 1	14,78	2,66	3 274,086	60,045	65,410	7,898
Vzorek 2	14,79	2,76	2 845,586	58,734	68,930	7,996
Vzorek 3	14,80	2,64	3 150,397	61,937	66,550	9,268
Vzorek 4	14,80	2,61	2 969,066	54,637	57,380	8,381
Vzorek 5	14,79	2,65	3 097,567	54,358	58,810	8,017
Vzorek 6	14,77	2,50	3 447,988	61,783	59,410	8,313
Vzorek 7	14,73	2,55	2 695,033	54,303	54,180	9,576
Vzorek 8	14,80	2,60	2 749,233	60,086	62,620	9,294
Vzorek 9	14,80	2,54	2 974,406	58,947	58,630	9,699
Vzorek 10	14,80	2,63	3 183,789	60,871	64,910	8,505
Průměr	14,79	2,61	3 038,715	58,570	61,683	8,695
S.D.	0,02	0,07	237,601	3,037	4,702	0,694

(zdroj: vlastní)



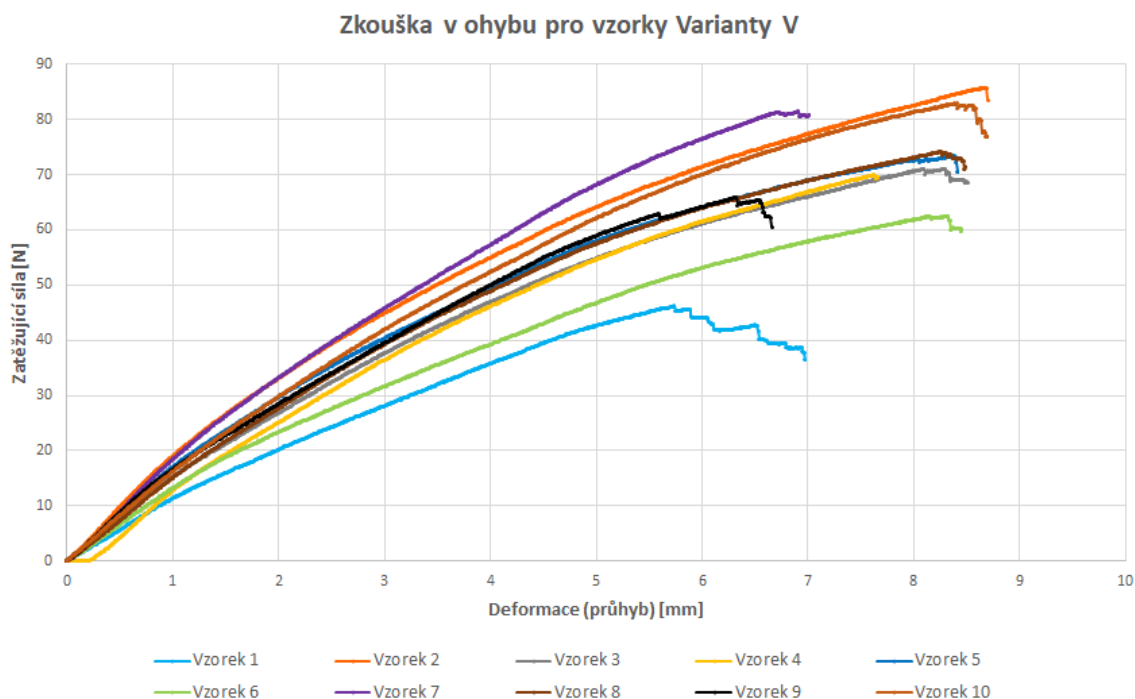
Obrázek 71 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty IV

(zdroj: vlastní)

Tabulka 30 Výsledky zkoušky v ohybu pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta V

Varianta V	b [mm]	h [mm]	Modul v ohybu [MPa]	Nejvyšší napětí [MPa]	Nejvyšší síla [N]	Nejvyšší deformace [mm]
Vzorek 1	14,78	2,62	2 781,009	43,744	46,230	5,737
Vzorek 2	14,81	2,77	4 302,418	72,442	85,750	8,666
Vzorek 3	14,77	2,73	3 521,755	61,963	71,050	8,095
Vzorek 4	14,80	2,62	2 322,284	66,071	69,920	7,615
Vzorek 5	14,77	2,70	4 193,269	65,416	73,370	8,372
Vzorek 6	14,75	2,53	3 843,020	63,530	62,480	8,145
Vzorek 7	14,80	2,70	4 238,735	72,455	81,430	6,909
Vzorek 8	14,75	2,56	3 900,549	73,639	74,150	8,236
Vzorek 9	14,70	2,82	3 711,336	54,101	65,880	6,323
Vzorek 10	14,81	2,71	3 773,519	73,135	82,860	8,388
Průměr	14,77	2,68	3 658,789	64,650	71,312	7,649
S.D.	0,03	0,09	642,919	9,625	11,523	0,992

(zdroj: vlastní)



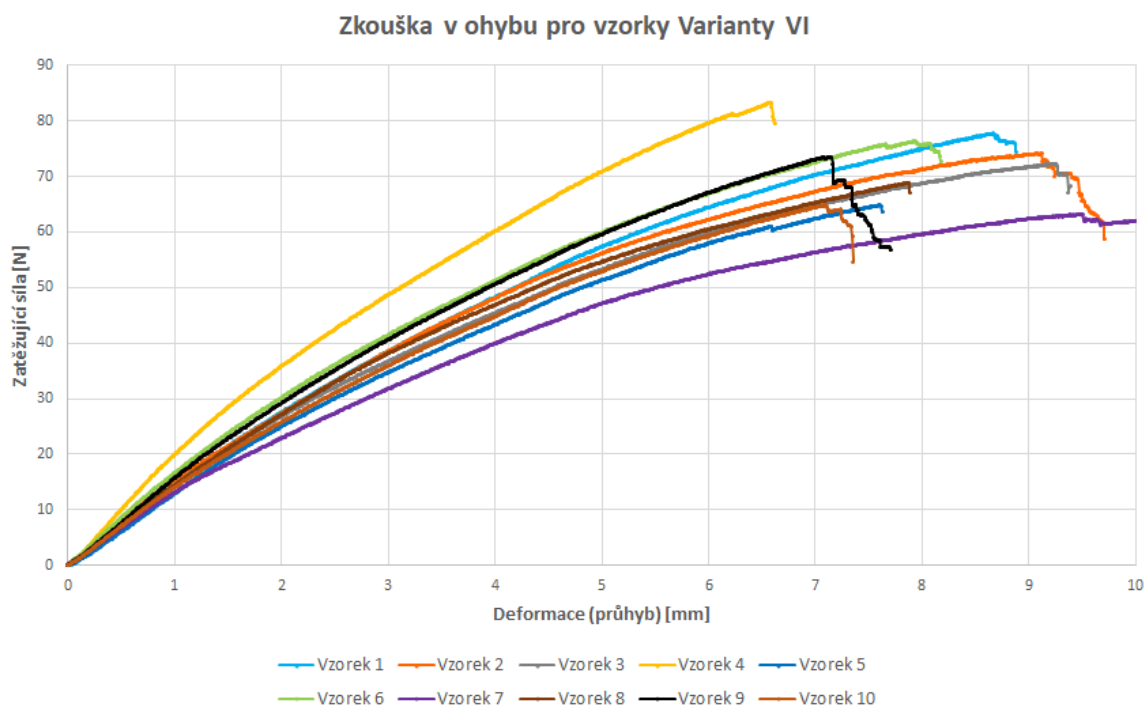
Obrázek 72 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty V

(zdroj: vlastní)

Tabulka 31 Výsledky zkoušky v ohybu pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VI

Varianta VI	b [mm]	h [mm]	Modul v ohybu [MPa]	Nejvyšší napětí [MPa]	Nejvyšší síla [N]	Nejvyšší deformace [mm]
Vzorek 1	14,83	2,63	3 703,458	72,755	77,740	8,664
Vzorek 2	14,78	2,65	3 813,924	68,583	74,150	9,119
Vzorek 3	14,78	2,54	3 698,769	72,749	72,260	9,227
Vzorek 4	14,78	2,92	3 782,497	63,396	83,220	6,580
Vzorek 5	14,78	2,62	3 217,749	61,315	64,800	7,598
Vzorek 6	14,78	2,68	4 044,734	69,019	76,320	7,933
Vzorek 7	14,70	2,73	3 037,310	55,370	63,190	9,494
Vzorek 8	14,70	2,69	3 334,307	62,137	68,850	7,857
Vzorek 9	14,75	2,63	3 824,315	69,094	73,430	7,078
Vzorek 10	14,73	2,67	3 432,897	59,305	64,870	7,098
Průměr	14,76	2,68	3 588,996	65,372	71,883	8,065
S.D.	0,04	0,10	310,270	6,417	8,173	1,106

(zdroj: vlastní)



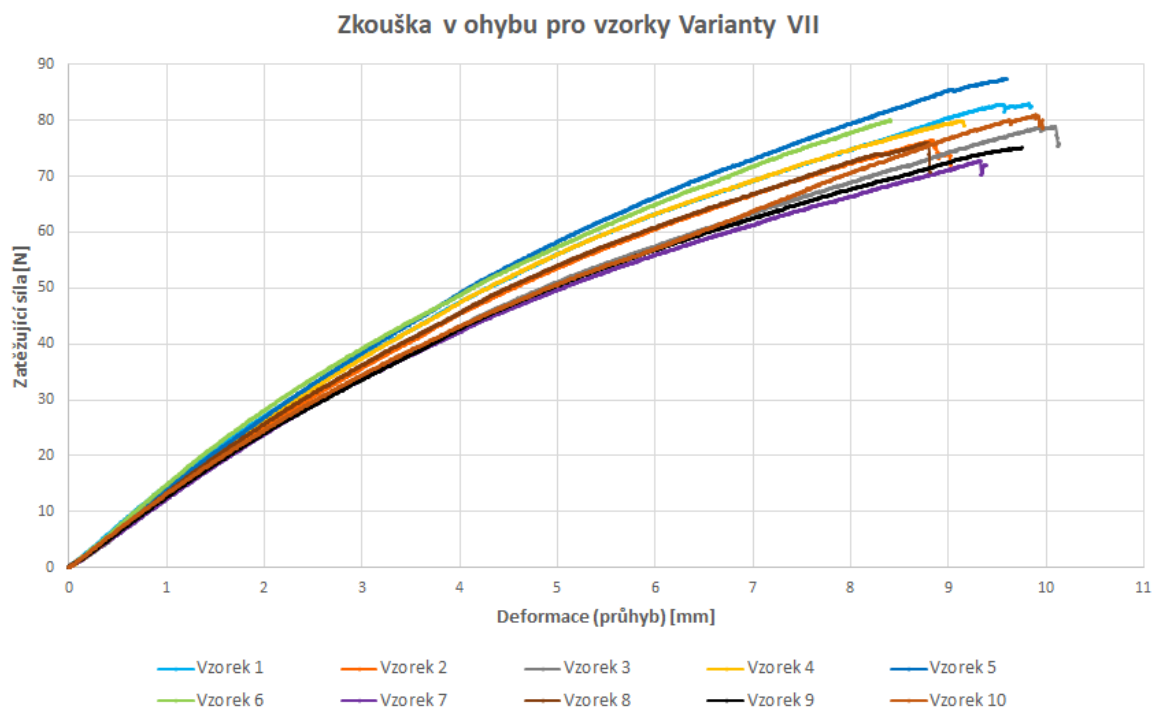
Obrázek 73 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty VI

(zdroj: vlastní)

Tabulka 32 Výsledky zkoušky ohybu pro 2501A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VII

Varianta VII	b [mm]	h [mm]	Modul v ohybu [MPa]	Nejvyšší napětí [MPa]	Nejvyšší síla [N]	Nejvyšší deformace [mm]
Vzorek 1	14,75	2,25	5 872,423	106,630	82,940	9,828
Vzorek 2	14,75	2,25	4 986,320	98,247	76,420	8,842
Vzorek 3	14,76	2,15	5 476,961	110,917	78,830	10,086
Vzorek 4	14,77	2,30	5 083,804	98,134	79,870	9,136
Vzorek 5	14,80	2,23	5 346,970	113,910	87,330	9,581
Vzorek 6	14,76	2,26	5 740,503	101,898	80,020	8,411
Vzorek 7	14,75	2,25	4 733,651	93,375	72,630	9,309
Vzorek 8	14,86	2,33	4 642,999	90,308	75,890	8,771
Vzorek 9	14,73	2,23	4 988,117	98,345	75,040	9,749
Vzorek 10	14,77	2,20	5 669,588	108,668	80,920	9,892
Průměr	14,77	2,25	5 254,134	102,043	78,989	9,360
S.D.	0,04	0,05	430,194	7,751	4,256	0,558

(zdroj: vlastní)



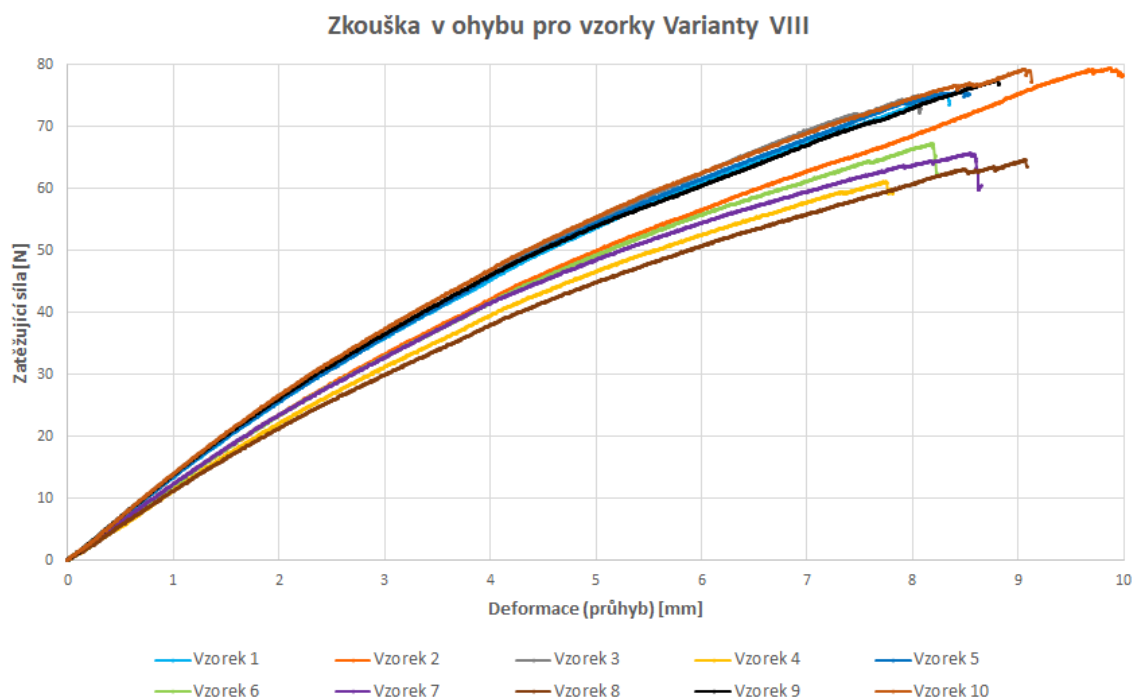
Obrázek 74 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty VII

(zdroj: vlastní)

Tabulka 33 Výsledky zkoušky ohybu pro 2502A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VIII

Varianta VIII	b [mm]	h [mm]	Modul v ohybu [MPa]	Nejvyšší napětí [MPa]	Nejvyšší síla [N]	Nejvyšší deformace [mm]
Vzorek 1	14,83	2,18	5 970,656	102,432	75,200	8,333
Vzorek 2	14,80	2,16	5 380,141	110,360	79,380	9,881
Vzorek 3	14,85	2,25	5 250,824	95,696	74,940	8,052
Vzorek 4	14,86	2,19	4 528,292	82,234	61,050	7,746
Vzorek 5	14,77	2,27	5 372,971	95,434	75,660	8,479
Vzorek 6	14,74	2,19	5 258,345	91,173	67,140	8,166
Vzorek 7	14,86	2,18	5 265,933	89,284	65,680	8,535
Vzorek 8	14,74	2,17	5 094,549	89,307	64,570	9,061
Vzorek 9	14,74	2,22	5 901,133	102,615	77,650	8,801
Vzorek 10	14,84	2,25	5 499,674	101,255	79,240	9,062
Průměr	14,80	2,21	5 352,252	95,979	72,051	8,612
S.D.	0,05	0,04	405,314	8,314	6,747	0,616

(zdroj: vlastní)



Obrázek 75 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty VIII

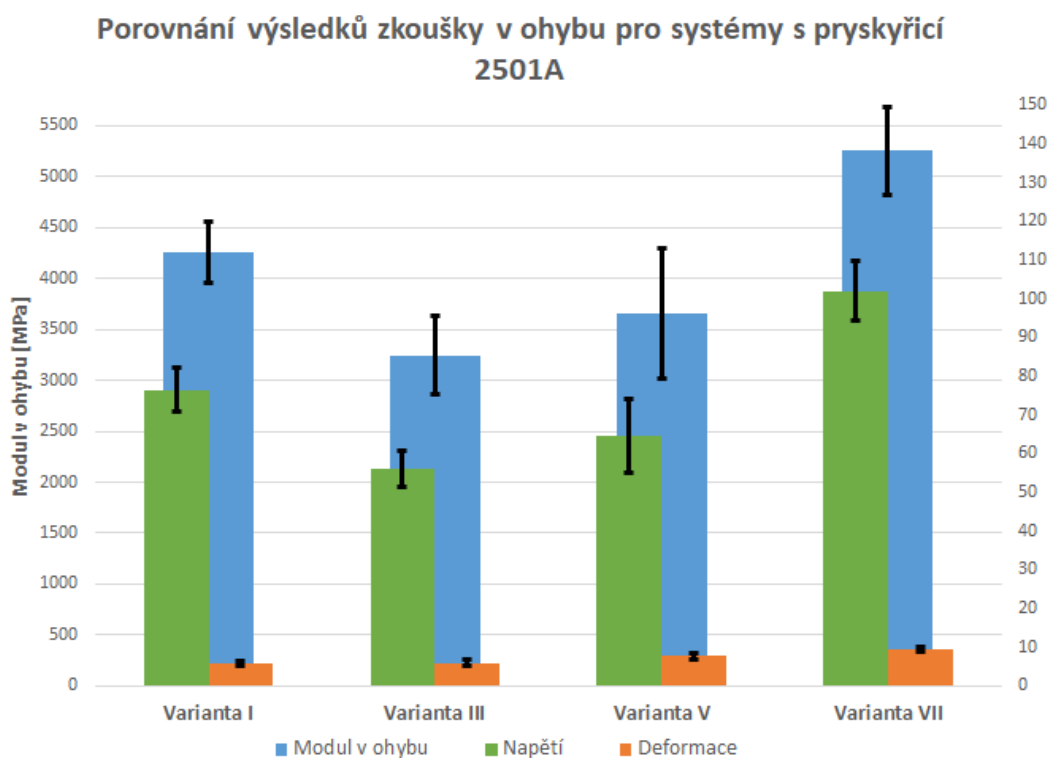
(zdroj: vlastní)

12.2.4 Vyhodnocení výsledků zkoušky ohybem

Tabulka 34 Průměrné hodnoty výsledků zkoušky ohybem u systémů s pryskyřicí 2501A

	Modul v ohybu [MPa]	Napětí [MPa]	Deformace [mm]
Varianta I	4 262,589	76,487	5,915
Varianta III	3 242,929	56,007	6,003
Varianta V	3 658,789	64,65	7,649
Varianta VII	5 254,134	102,043	9,36

(zdroj: vlastní)



Obrázek 76 Grafické vyjádření dosažených průměrných hodnot zkouškou ohybem pro varianty s pryskyřicí 2501A

(zdroj: vlastní)

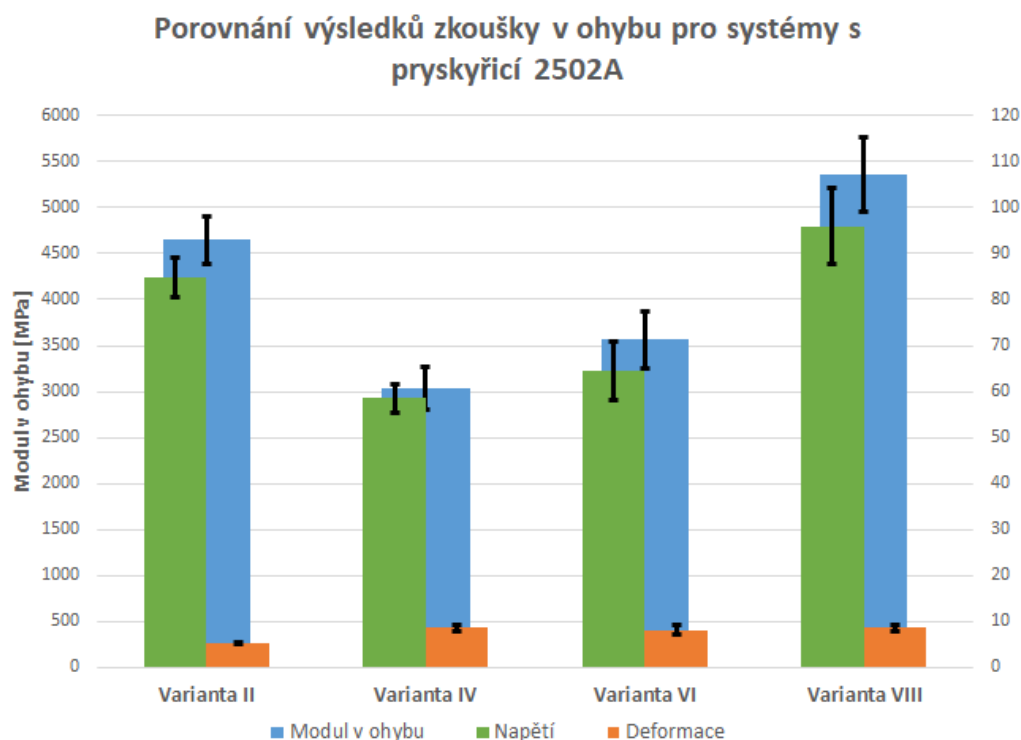
Dosažené výsledky provedených zkoušek ohybem pro systémy pryskyřice 2501A jsou shrnuty v tabulce 34 a graficky vyjádřeny na obrázku 76. Černě jsou na obrázcích 76 a 77 vyneseny hodnoty směrodatných odchylek měření jednotlivých variant. Z výsledků je patrné, že systém epoxidové pryskyřice 2501A bez příměsi retardantu (varianta VII) vykazuje nejvyšší odolnost proti namáhání ohybem. Vykazuje nejvyšší hodnotu modulu pružnosti v ohybu a k porušení došlo při nejvyšší hodnotě napětí. Systém s tkaninou

namáčenou ve 20 hmotnostních % roztoku práškového retardantu v demineralizované vodě (varianta I) vykazuje ve srovnání se systémem bez příměsí mírný pokles hodnoty modulu pružnosti v ohybu. Hodnota dosaženého průhybu před porušením je však o 36,8 % nižší než u systému bez příměsí. To ukazuje na poměrně vysokou pevnost v ohybu, avšak příměs snížila elasticitu materiálu. Varianta III, ve které je příměs retardantu obsažena v matrici i výztuži, pak vykazuje obdobnou hodnotu deformace před porušením jako předchozí systém. Naopak pevnostní vlastnosti pak tento systém vykazuje ještě nižší.

Tabulka 35 Průměrné hodnoty výsledků zkoušky ohybem u systémů s pryskyřicí 2502A

	Modul v ohybu [MPa]	Napětí [MPa]	Deformace [mm]
Varianta II	4 646,995	84,766	5,321
Varianta IV	3 038,715	58,57	8,695
Varianta VI	3 566,635	64,43	8,229
Varianta VIII	5 352,252	95,979	8,612

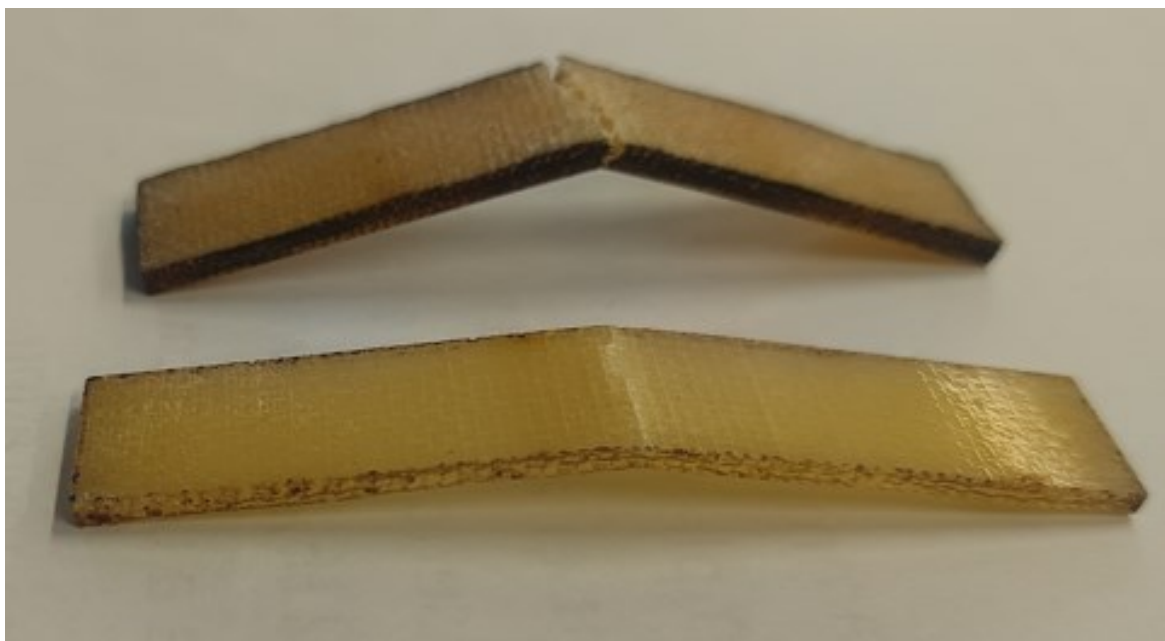
(zdroj: vlastní)



Obrázek 77 Grafické vyjádření dosažených průměrných hodnot zkouškou ohybem pro varianty s pryskyřicí 2502A

(zdroj: vlastní)

U systémů na bázi epoxidové pryskyřice 2502A se ukázalo, že hodnota průhybu před porušením materiálu je u tří případů velmi obdobná. Výjimkou je systém s příměsí retardantu pouze ve výztuži, kde je u tohoto parametru patrný výrazný pokles. U pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu je situace obdobná jako u systémů s pryskyřicí 2501A – nejvyšší hodnoty vykazuje systém bez příměsí retardantu, namáčení tkaniny pak u těchto parametrů znamená mírný pokles. Naopak pokud byl retardant přidán i do pryskyřice, pevnostní vlastnosti vykazaly výrazný pokles.



Obrázek 78 Porušená zkušební tělesa po provedení zkoušky ohybem

(zdroj: vlastní)

13 ZKOUŠKA HOŘLAVOSTI

Po provedení zkoušek mechanických vlastností byly připravené vzorky v podobě destiček o rozměru 100 x 100 mm podrobeny zkoušce hořlavosti. Pro tuto zkoušku byla zvolena metoda kónické kalorimetrie, která je standardizována normovaným předpisem ISO 5660.

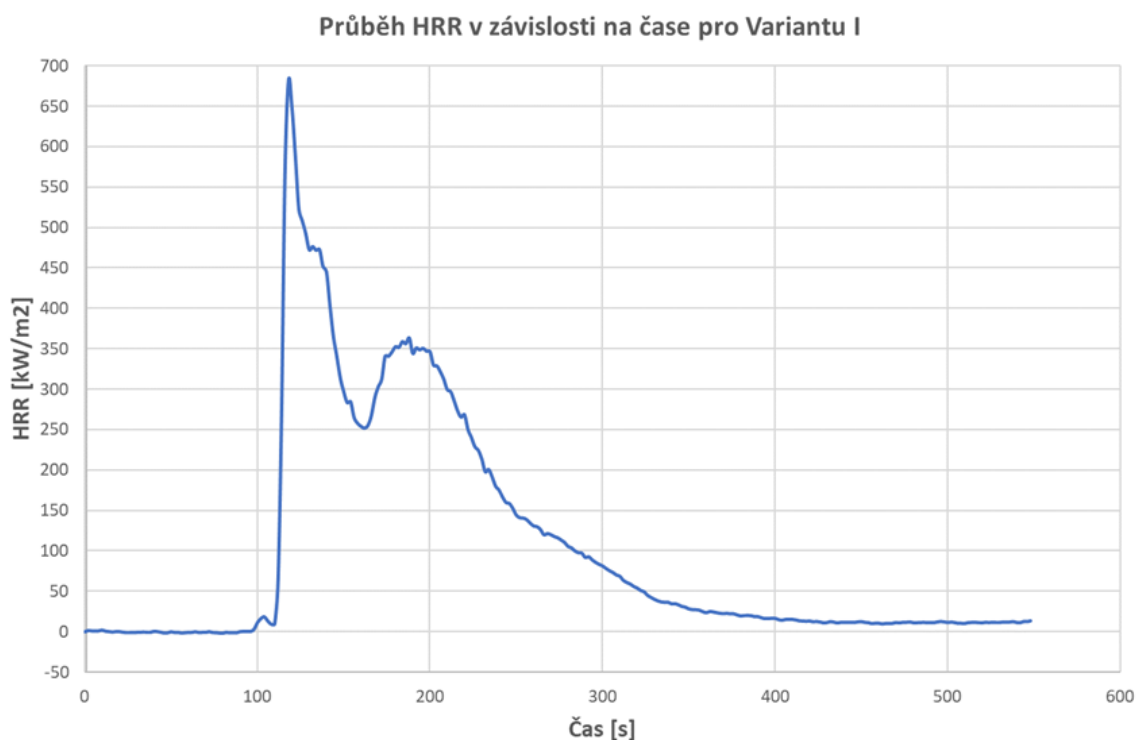
13.1 Výsledky jednotlivých měření zkoušky hořlavosti

Pro vyhodnocení zkoušky byly sledovány parametry jako rychlost uvolňování tepla (HRR), celkem uvolněné množství tepla (THR) dobu do vznícení (TTI), dobu do zhašení plamene (TTF) a maximální průměrná rychlost uvolňování tepla (MARHE). Výsledkem zkoušky je také diagram průběhu HRR v závislosti na čase. Přílohou číslo VI této diplomové práce jsou výstupní soubory měření ze softwaru ConeCalc v6.5a.

Tabulka 36 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2501A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta I

Varianta I	Hodnota
Tloušťka [mm]	3,17
HRR průměr [kW/m^2]	124,31
HRR peak [kW/m^2]	681,35
THR [MJ/m^2]	53,7
TTI [s]	116
TTF [s]	446
MARHE [kW/m^2]	183,8
Délka zkoušky [s]	548

(zdroj: vlastní)



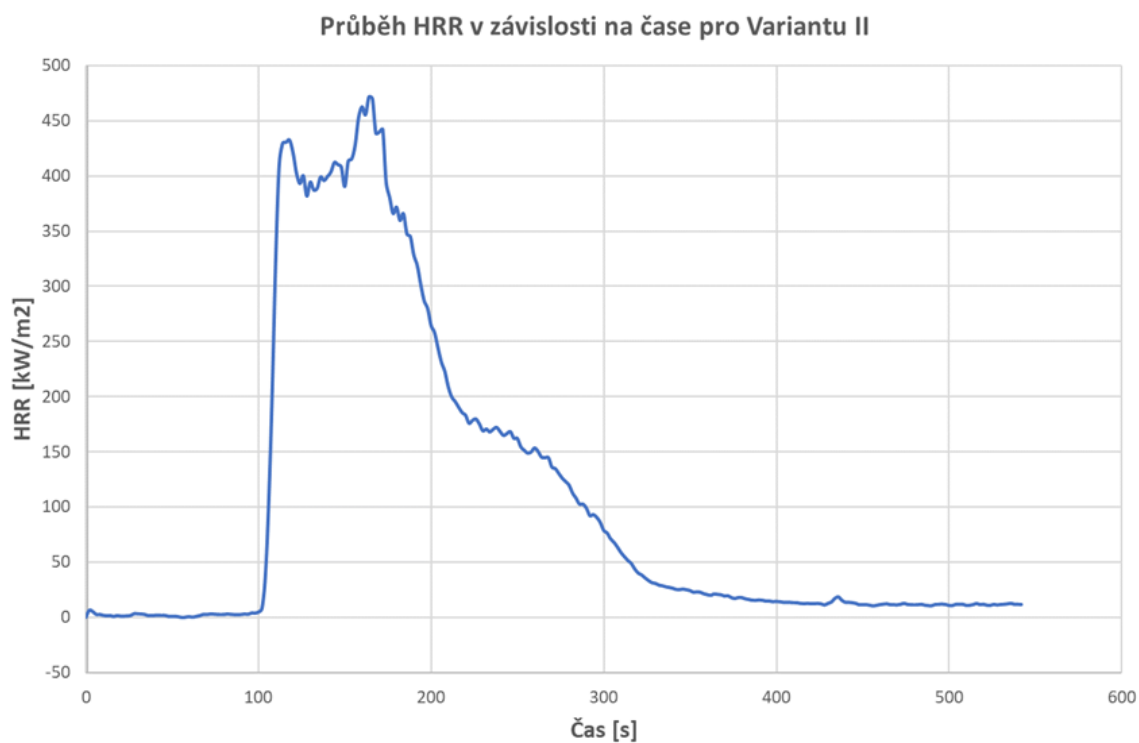
Obrázek 79 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu 1

(zdroj: vlastní)

Tabulka 37 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2502A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta II

Varianta II	Hodnota
Tloušťka [mm]	3,27
HRR průměr [kW/m ²]	128,88
HRR peak [kW/m ²]	471,95
THR [MJ/m ²]	56,5
TTI [s]	107
TTF [s]	438
MARHE [kW/m ²]	188,3
Délka zkoušky [s]	542

(zdroj: vlastní)



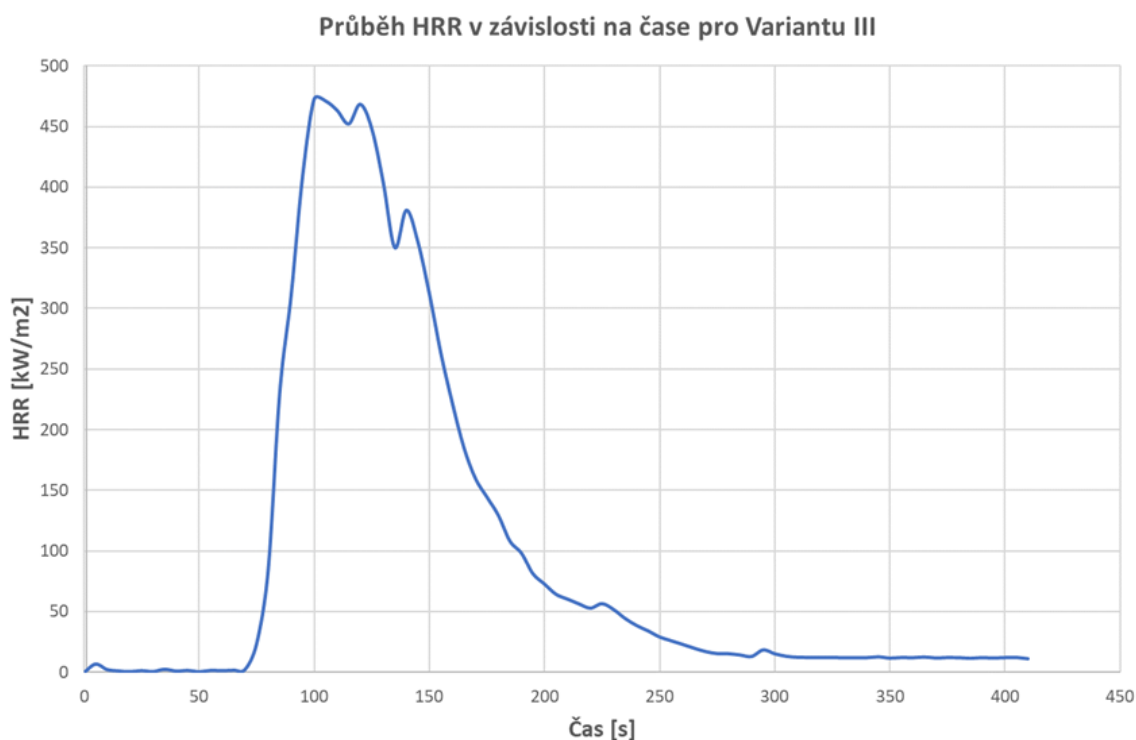
Obrázek 80 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu II

(zdroj: vlastní)

Tabulka 38 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina namáčená v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta III

Varianta III	Hodnota
Tloušťka [mm]	2,80
HRR průměr [kW/m ²]	118,59
HRR peak [kW/m ²]	472,55
THR [MJ/m ²]	39,9
TTI [s]	77
TTF [s]	290
MARHE [kW/m ²]	194,9
Délka zkoušky [s]	410

(zdroj: vlastní)



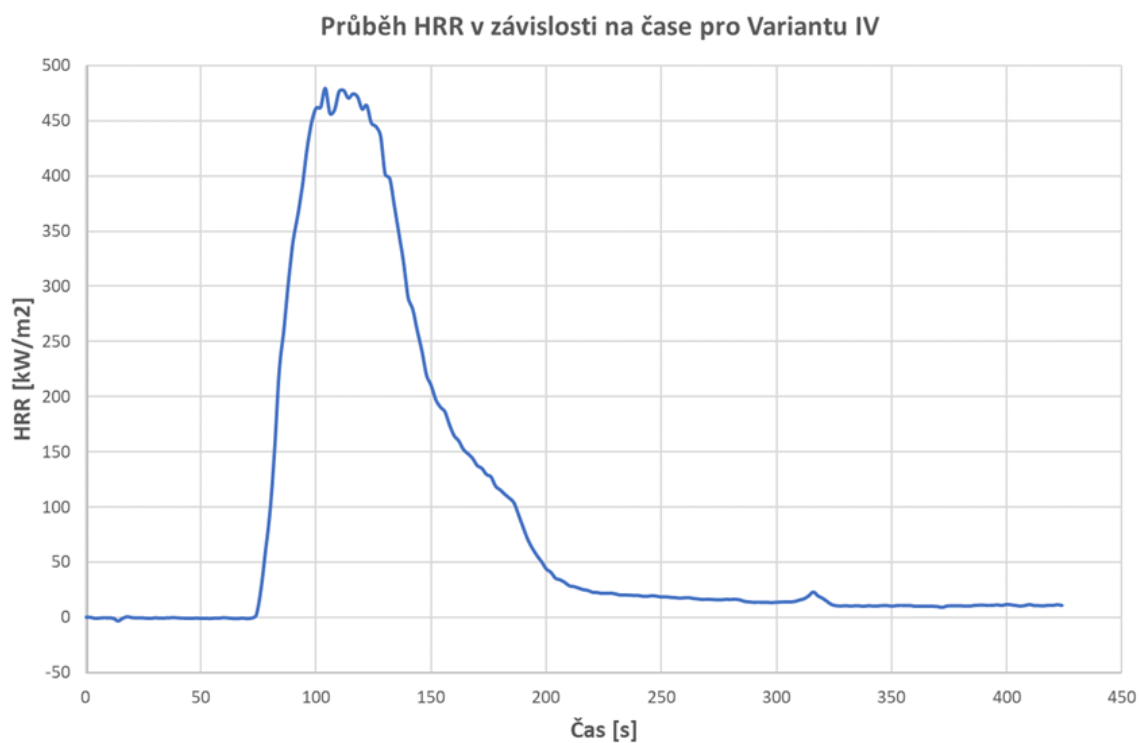
Obrázek 81 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu III

(zdroj: vlastní)

Tabulka 39 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina namáčená v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta IV

Varianta IV	Hodnota
Tloušťka [mm]	2,82
HRR průměr [kW/m^2]	103,53
HRR peak [kW/m^2]	479,46
THR [MJ/m^2]	35,4
TTI [s]	82
TTF [s]	320
MARHE [kW/m^2]	179,9
Délka zkoušky [s]	424

(zdroj: vlastní)



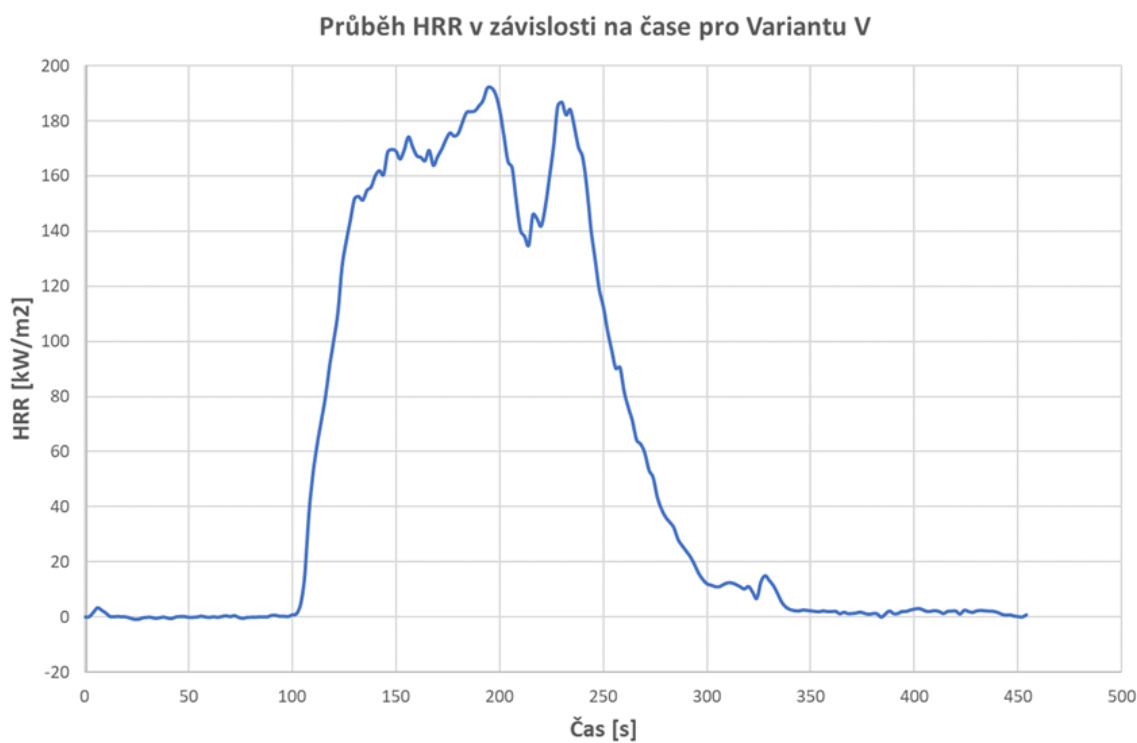
Obrázek 82 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu IV

(zdroj: vlastní)

Tabulka 40 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta V

Varianta V	Hodnota
Tloušťka [mm]	2,74
HRR průměr [kW/m ²]	72,69
HRR peak [kW/m ²]	192,02
THR [MJ/m ²]	24,9
TTI [s]	112
TTF [s]	334
MARHE [kW/m ²]	89,4
Délka zkoušky [s]	454

(zdroj: vlastní)



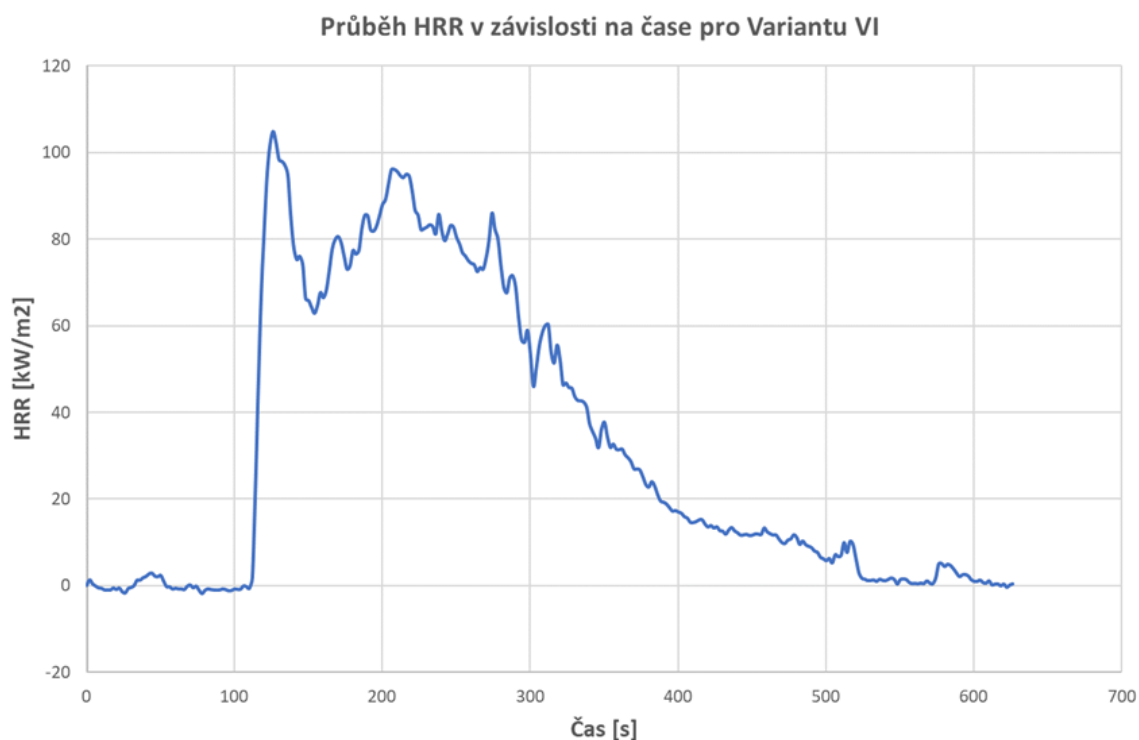
Obrázek 83 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu V

(zdroj: vlastní)

Tabulka 41 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VI

Varianta VI	Hodnota
Tloušťka [mm]	2,71
HRR průměr [kW/m ²]	38,21
HRR peak [kW/m ²]	104,88
THR [MJ/m ²]	19,5
TTI [s]	119
TTF [s]	521
MARHE [kW/m ²]	50
Délka zkoušky [s]	626

(zdroj: vlastní)



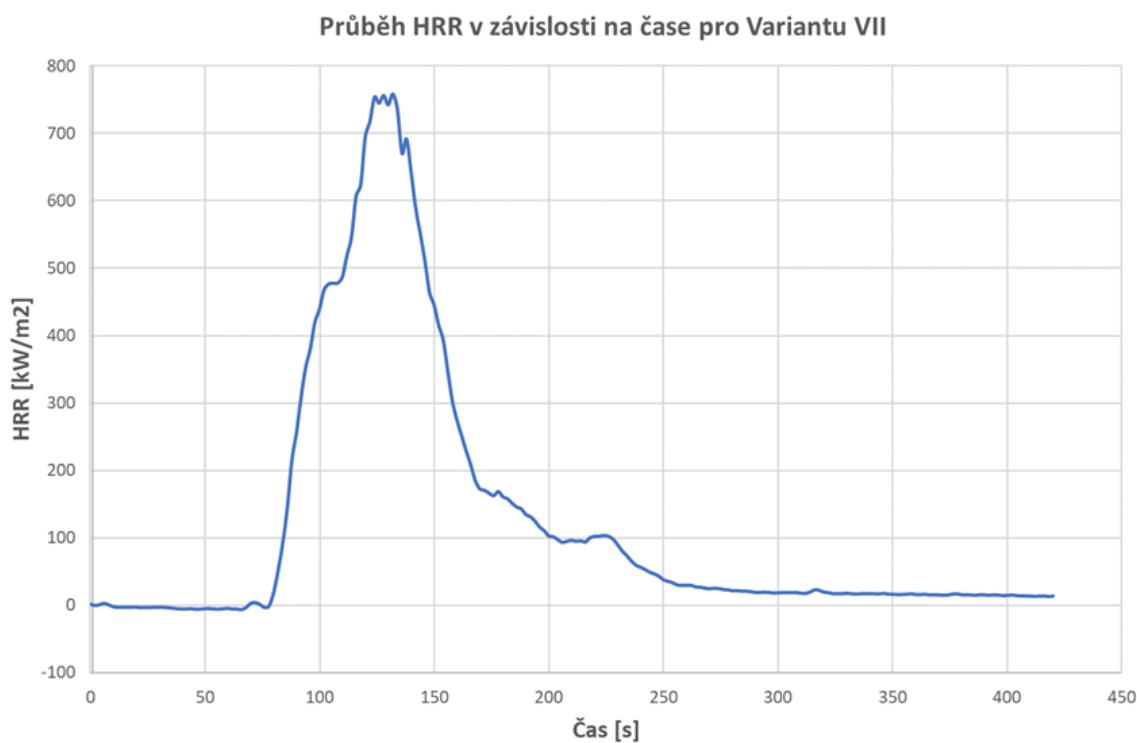
Obrázek 84 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu VI

(zdroj: vlastní)

Tabulka 42 Výsledky zkoušky ohybu pro 2501A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VII

Varianta VII	Hodnota
Tloušťka [mm]	2,3
HRR průměr [kW/m^2]	156,15
HRR peak [kW/m^2]	758,2
THR [MJ/m^2]	52,2
TTI [s]	86
TTF [s]	315
MARHE [kW/m^2]	243,1
Délka zkoušky [s]	420

(zdroj: vlastní)



Obrázek 85 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu VII

(zdroj: vlastní)

Tabulka 43 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2502A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VIII

Varianta VIII	Hodnota
Tloušťka [mm]	2,25
HRR průměr [kW/m^2]	138,7
HRR peak [kW/m^2]	826,11
THR [MJ/m^2]	61,8
TTI [s]	109
TTF [s]	441
MARHE [kW/m^2]	240,3
Délka zkoušky [s]	552

(zdroj: vlastní)



Obrázek 86 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu VIII

(zdroj: vlastní)

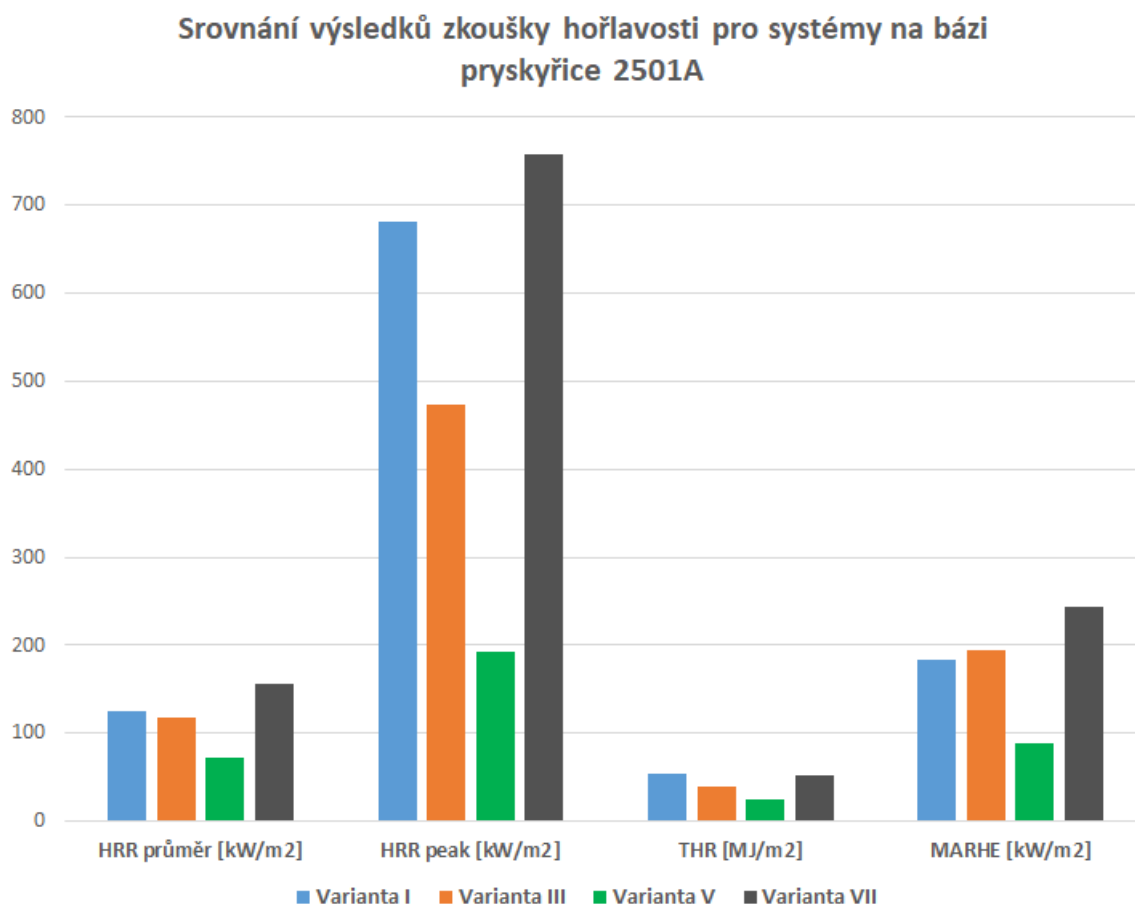
13.2 Vyhodnocení výsledků zkoušky hořlavosti

Tabulka 44 obsahuje souhrn dosažených výsledků pro systémy na bázi pryskyřice 2501A. Grafická znázornění těchto výsledků vyjadřují obrázky 87 a 88. U materiálové varianty III (příměs retardantu ve výztuži i matrici) a varianty V (příměs retardantu v matrici) došlo při zkoušce ke zkroucení testované desky.

Tabulka 44 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2501A

	Variantu I	Variantu III	Variantu V	Variantu VII
HRR průměr [kW/m ²]	124,31	118,59	72,69	156,15
HRR peak [kW/m ²]	681,35	472,55	192,02	758,2
THR [MJ/m ²]	53,7	39,9	24,9	52,2
TTI [s]	116	77	112	86
TTF [s]	446	290	334	315
MARHE [kW/m ²]	183,8	194,9	89,4	243,1

(zdroj: vlastní)

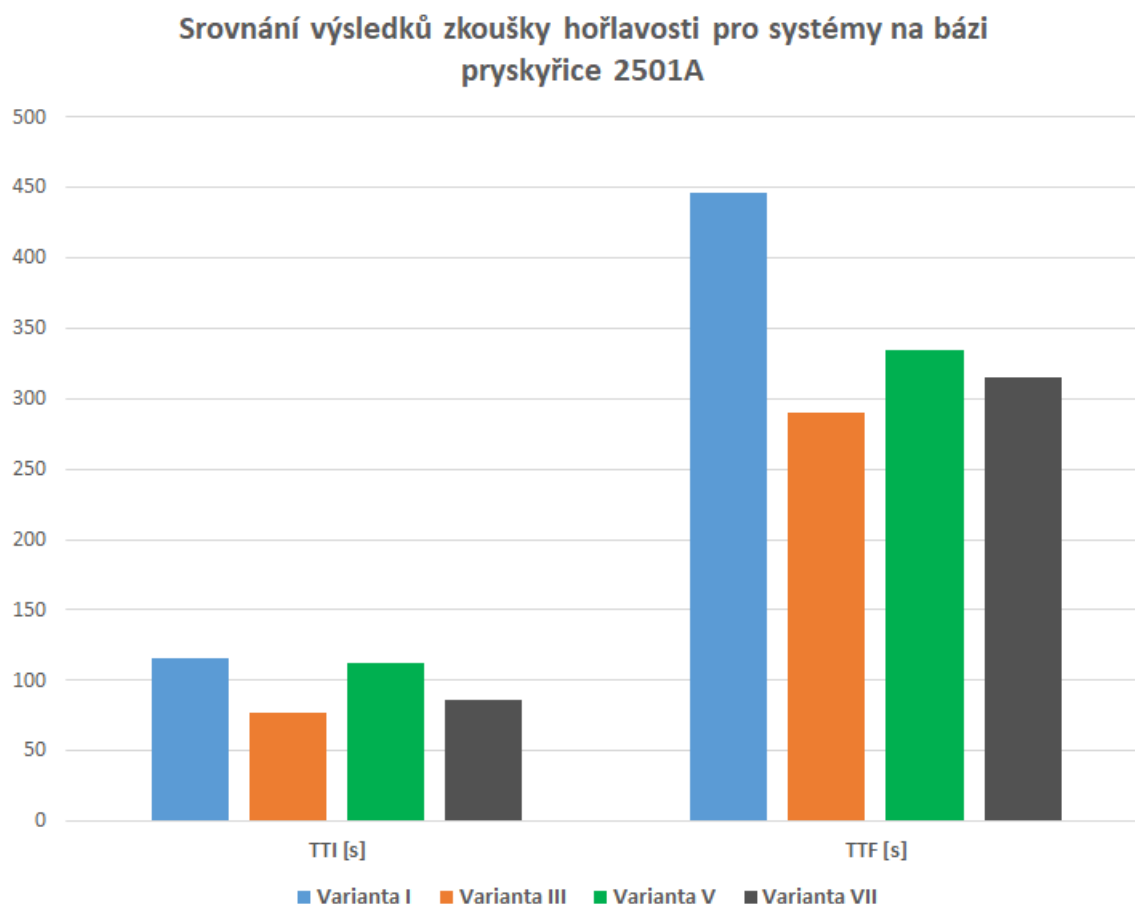


Obrázek 87 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2501A

(zdroj: vlastní)

Z dosažených výsledků je patrné, že ve srovnání s čistým systémem bez příměsí vykazuje systém s příměsí retardantu pouze ve výztuži (Varianta I) snížení dosažených hodnot HRR a prodloužení dobu potřebné ke vznícení systému a to o přibližně 35 %. O čtvrtinu se pak snížila maximální průměrná rychlost uvolňování tepla MARHE. Srovnatelnou dobu potřebnou ke vznícení systému vykazovala také Varianta V (příměs retardantu pouze v matrici). Tato materiálová varianta však vykazovala nejnižší hodnoty uvolněného tepla a nejnižší rychlost MARHE. U příměsí do výztuže i matrice (Varianta III) sice ke snížení odolnosti proti vznícení oproti čistému systému nedošlo, avšak retardant splnil svou funkci tím, že snížil množství uvolňovaného tepla při hoření.

Na základě tohoto srovnání lze říci, že příměs retardantu do pryskyřice 2501A má výrazný vliv na odolnost materiálu vůči hoření, avšak za cenu deformace materiálu při hoření. Další nevýhodou představuje vznik vysoce viskózního systému, pro který je nutné zvolit jinou výrobní technologii než vakuovou infuzi.



Obrázek 88 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2501A – doba do vznícení a uhašení plamene

(zdroj: vlastní)

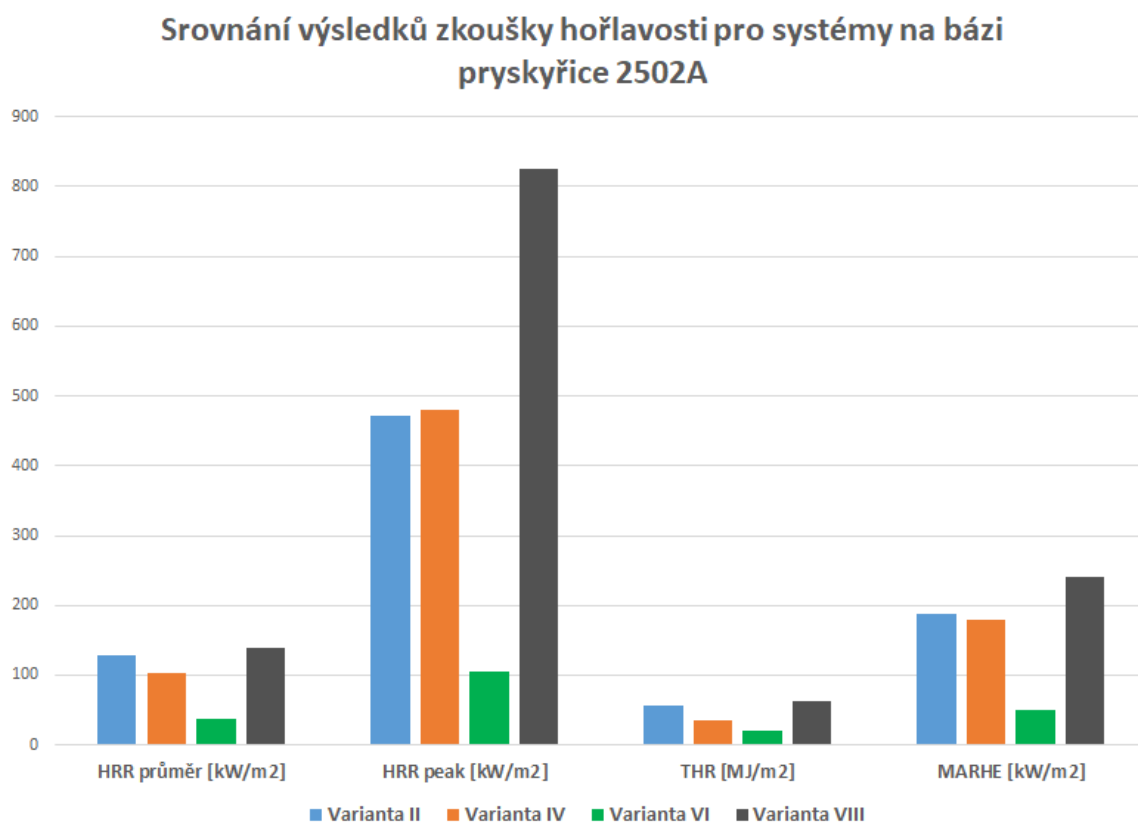
V tabulce 45 jsou vyjádřeny naměřené hodnoty ze zkoušek hořlavosti jednotlivých systémů na bázi systému pryskyřice 2502A. Tyto výsledky pak graficky znázorňují obrázky 89 a 90. U materiálové varianty IV (příměs retardantu v matrici) došlo při zkoušce ke zkroucení testované desky.

Výsledky ukázaly, že čistý systém pryskyřice s 2502A bez příměsí retardantu (Varianta VIII) uvolňuje během hoření velké množství tepla a poměrně vysokou rychlostí. Zároveň má však tento systém sklon delší dobu odolávat vznícení než čistý systém s pryskyřicí 2501A. Naopak doba potřebná k uhašení plamene je výrazně delší. Příměs retardantu pouze do pryskyřice (Varianta VI) pak vykazuje ještě vyšší odolnost vůči vznícení. Po vznícení se pak z tohoto systému uvolňuje jen velmi málo tepla a velmi nízkou rychlostí (hodnota MARHE). Retardant tak v tomto systému plní svou funkci výborně.

Tabulka 45 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2502A

	Varianta II	Varianta IV	Varianta VI	Varianta VIII
HRR průměr [kW/m^2]	128,88	103,53	38,21	138,7
HRR peak [kW/m^2]	471,95	479,46	104,88	826,11
THR [MJ/m^2]	56,5	35,4	19,5	61,8
TTI [s]	107	82	119	109
TTF [s]	438	320	521	441
MARHE [kW/m^2]	188,3	179,9	50	240,3

(zdroj: vlastní)

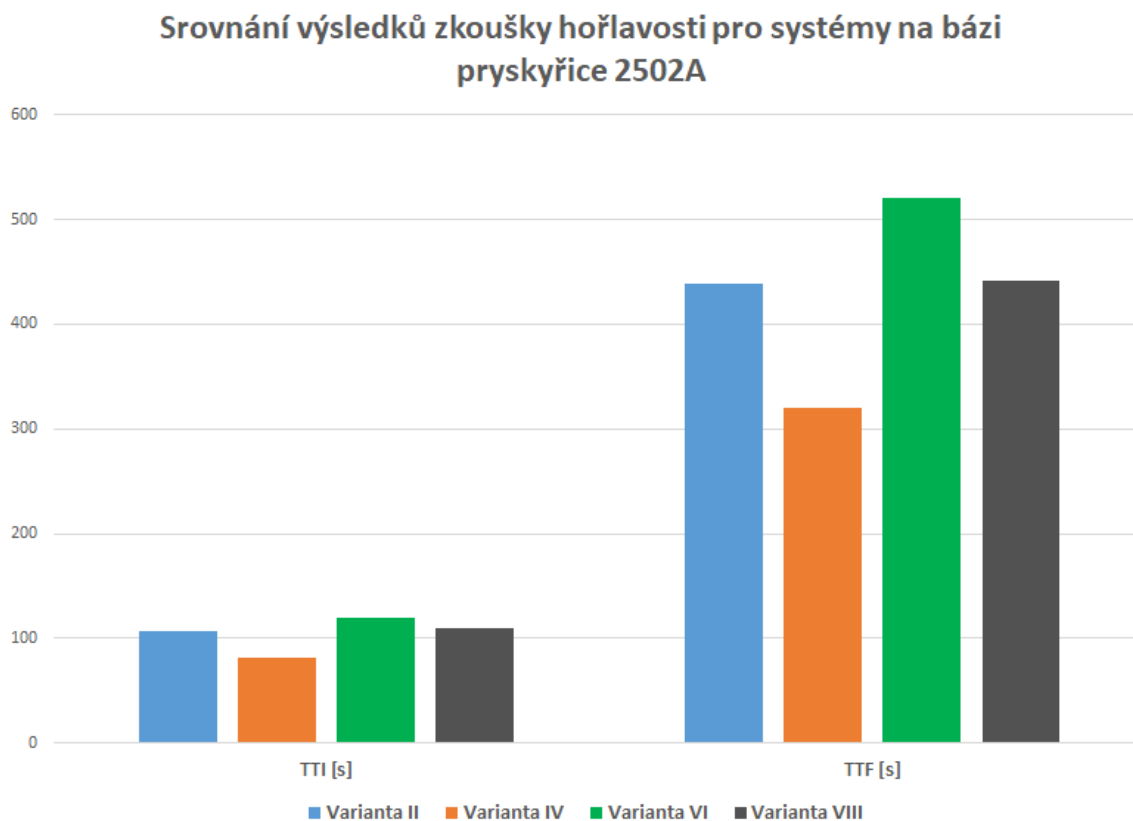


Obrázek 89 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2502A

(zdroj: vlastní)

Příměs retardantu pouze do výztuže (Varianta II) pak vykazuje nižší hodnotu uvolněného tepla než čistý systém bez příměsi. Rychlost uvolnění se pak snížila téměř o čtvrtinu. Vliv retardantu na hořlavost je tak také patrný. Příměs ve výztuži i matrici (Varianta IV) pak snižuje množství uvolněného tepla o více než 40 % a o téměř 25 % nižší rychlostí.

Platí pak tedy podobný závěr jako u systémů na bázi 2501A. Příměs retardantu do matrice má velmi výrazný vliv na zvýšení odolnosti proti hoření materiálu. Příměs do výztuže i matrice také zvyšuje odolnost systému vůči hoření, avšak nevýhodou tohoto systému je deformace materiálu.



Obrázek 90 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2502A – doba do vznícení a uhašení plamene

(zdroj: vlastní)

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověřit vliv pryskyřice obsahující biologickou složku na vlastnosti kompozitních materiálů. Pro tuto diplomovou práci byly zvoleny dva systémy epoxidové pryskyřice s různým obsahem biologické složky. Prozkoumán byl také vliv příměsí v podobě retardantu hoření na biologické bázi do výztuže i matrice na mechanické vlastnosti takto vyrobených kompozitů. Diplomová práce zahrnuje návrh testování vyráběných kompozitů, návrh materiálové skladby a postup při výrobě a testování mechanických vlastností vyráběných materiálů. Při návrhu materiálové skladby testovaných produktů bylo vycházeno z literární rešerše diplomové práce.

Na základě zjištění z literární rešerše je navržen experiment testování mechanických vlastností rázovou zkouškou houževnatosti Izod, zkouškou ohybem a zkouškou hořlavosti pro dva systémy epoxidové pryskyřice s různým obsahem biologické složky vyztužené lněnou tkaninou. Jako výchozí materiály pro matrici byly zvoleny dvousložkové systémy FormuLITE 2501A a FormuLITE 2502A, které se oba vytvrzují smícháním s vytvrzovacím činidlem FormuLITE 2402B. Pro zjištění vlivu příměsí retardantu hoření na mechanické vlastnosti byly pro každý ze systémů pryskyřice navrženy čtyři materiálové varianty – kompozit bez příměsí, kompozit s příměsí retardantu pouze do výztuže, kompozit s příměsí retardantu ve výztuži i matrici a kompozit s příměsí retardantu pouze v matrici. Jako retardant hoření je zvolena prášková podoba dihydrogenfosforečnanu amonného.

Při výrobě vzorků k testování se ukázalo, že obsah biologické složky má vliv na viskozitu matrice. Pryskyřice 2501A, obsahující vyšší podíl biologické složky, vykazuje vyšší viskozitu než pryskyřice 2502A. Příměs práškového retardantu do již tak poměrně viskózních systémů vykazala další výrazné navýšení viskozity. To mělo za následek velmi obtížnou výrobu využitím technologie vakuové infuze.

Srovnáme-li naměřené hodnoty rázové houževnatosti Izod pro systémy obou pryskyřic bez příměsí retardantu v kompozitech, dojdeme k poznatku, že vyšší rázovou houževnatost má pryskyřice 2501A, což je pryskyřice s vyšším obsahem biologické složky. U materiálů, kde byl retardant přidán pouze namáčením tkaniny, došlo k poklesům této charakteristiky, a to o téměř 55 % v případě pryskyřice 2501A, a o 45,4 % u pryskyřice 2502A. Příměs retardantu do matrice i výztuže pak u pryskyřice 2501A vykazala nejmenší hodnotu rázové houževnatosti u materiálu na bázi této pryskyřice. Naopak u systému na bázi 2502A došlo

k poklesu oproti čistému systému této pryskyřice o 22,5 %, což se jeví jako přijatelný kompromis pro určité typy aplikací.

U systémů obou pryskyřic s příměsí retardantu do matrice navíc, dle dosažených výsledků, dochází ke snížení pevnostních vlastností. Příměs retardantu pouze do výztuže však má za následek pokles rázové houževnatosti. Proto se jeví jako vhodnější příměs retardantu do výztuže než do matrice. Příměsí pouze do matrice pak u obou systémů ukazují poměrně dobré vlastnosti rázové houževnatosti. Nevýhodou v těchto případech je pak ale nutnost použití jiné technologie než vakuové infuze. To má za následek nestejnou sílu stěny vyráběných kompozitů a vyšší nároky pracovníka vyrábějící tyto součásti..

Dosažené výsledky u zkoušky ohybem ukázaly, že ve srovnání čistých systémů bez příměsí práškového retardantu si lépe stojí pryskyřice 2502A s nižším obsahem biologické složky než pryskyřice 2501A. Pryskyřice 2502A vykazuje vyšší hodnoty meze pevnosti i modulu pružnosti v ohybu. Systém pryskyřice 2501A bez přidání retardantu hoření naopak vykazuje vyšší hodnotu deformace v ohybu, než došlo k porušení materiálu. To naznačuje lepší elastické chování. Ve srovnání systémů, kdy byl retardant přidán pouze do výztuže namáčením tkaniny si vyšší pevnostní charakteristiky opět lépe udržela opět pryskyřice 2502A. U obou pryskyřic však došlo oproti systémům bez příměsí k poklesu hodnoty dosažené deformace o 37 až 40 %.

U materiálů s retardantem hoření přidáním pouze do výztuže došlo u pryskyřice 2501A k poklesu schopnosti pružných deformací, u pryskyřice 2502A se hodnota deformace změnila pouze na úrovni statistické chyby. Hodnoty meze pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu jsou pak v těchto případech u obou pryskyřic na podobných úrovních.

V rámci čistých systémů bez příměsí se ukázalo, že vyšší obsah biologické složky v pryskyřici 2501A ovlivňuje také vlastnosti hoření materiálu. Čistý systém s pryskyřicí 2501A se vznítil za kratší dobu než systém na bázi 2502A. Tento systém také rychleji uvolňuje teplo, avšak uvolnil jej během zkoušky menší množství než čistý systém s 2502A. Experiment dále ukázal výrazný vliv příměsí retardantu na schopnost materiálu odolávat hoření. U obou systémů pryskyřice má nejvýraznější vliv příměs do výztuže i matrice. U systému s 2501A ale došlo při zkoušce ke zkroucení vzorku. Zkroutily se také vzorky obou variant s příměsí retardantu v matrici i výztuži. Tento jev je u určitých aplikací nežádoucí.

Varianty obou systémů pryskyřic s příměsí retardantu pouze ve výztuži pak vykazují, ve srovnání s čistými systémy příslušných pryskyřic, snížení ukazatele MARHE. U systému na bázi 2501A však došlo dokonce k nárůstu množství uvolněného tepla.

Materiály s přidáním retardantu v podobě prášku ukázaly v tomto experimentu své možnosti i omezení a nevýhody. Pro budoucí výzkum proto navrhuji otestovat stejné kompozitní materiály, skládající se z epoxidových pryskyřic 2501A a 2502A a lněné výztuže, avšak jako příměsný retardant hoření použít kapalinu v podobě kyseliny fytové.

Přínosem této diplomové práce je zjištění vlivu biologické složky a přidání retardantu hoření v podobě prášku do pryskyřice na viskozitu matrice a vliv této viskozity na různé výrobní technologie kompozitních materiálů. Zjištěny byly také vlivy příměsí práškového retardantu na mechanické chování, zejména na rázovou houževnatost a pevnost v ohybu, a také vlivy na odolnost vůči hoření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HORÁKOVÁ, por. Bc. Vendula. Hoření, hašení, ruční hasicí přístroje. Online. HASIČSKÝ ZÁCHRANNÝ SBOR ČESKÉ REPUBLIKY. Fire-rescue-service-of-czech-republic. 2021. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/hasicien/docDetail.aspx?docid=22249112&docType=ART>. [cit. 2024-02-03]
- [2] KUPILÍK, Václav. Stavební konstrukce z požárního hlediska. Grada Publishing, 2006. ISBN 80-247-1329-2.
- [3] VOLF, Oldřich. Požární taktika: Proces hoření. Online. Hasičský záchranný sbor: Konspekty odborné přípravy I. Dostupné z: https://metodika.cahd.cz/konspekty/1_1_01.pdf. [cit. 2024-02-03].
- [4] RŮŽIČKA, František a PECL, Jan. Rozdělení hořlavých látek a jejich požárně technické charakteristiky: Konspekty odborné přípravy jednotek požární ochrany. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1999. ISBN 80-86111-46-6.
- [5] LINDNER AG. Požární bezpečnost staveb třídy reakce na oheň u stavebních materiálů. Online. LINDNER AG. Interiérové systémy Lindner. Dostupné z: <https://systemy-lindner.cz/zdvojene-podlahy-pozarni-bezpecnost-staveb.html>. [cit. 2024-02-03].
- [6] FILIPI, Bohdan. Nauka o materiálu. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 2003. ISBN 80-86634-11-6.
- [7] KOLEKTIV AUTORŮ. Návod na laboratorní práce Ústavu technologie ropy a alternativních paliv VŠCHT Praha. Online. Dostupné z: https://utrap.vscht.cz/files/uzel/0014520/0004~8zu8sCw_pVKhoChfIScxKb8osSS_KO_wWqDA4YXJqQqHdxWXJJJaVKhgZmgIA.pdf?redirected. [cit. 2024-02-04].
- [8] Proces hoření. Online. GUARD7, V.O.S. Guard7. 2022. Dostupné z: <https://www.guard7.cz/proces-horeni/>. [cit. 2024-02-04].
- [9] UHROVÁ, Ilona Ing. Šíření plamene po vrstvě prachu tvořené dřevní biomasou. Online. In: Tzb-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomasou>. [cit. 2024-02-04].

- [10] KIM, Y.; LEE, S. a YOON, H. Fire-Safe polymer composites: Flame-retardant effect of nanofillers. Online. *Polymers*. 2021, roč. 13, č. 4, s. 1 - 49. ISSN 20734360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym13040540>. [cit. 2024-02-04].
- [11] ORLÍKOVÁ, Kateřina a ŠTROCH, Petr. *Chemie procesů hoření*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 1999. ISBN 80-86111-39-3.
- [12] KUBÁTOVÁ, Hana. *Průmyslová toxikologie a životní prostředí*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 2018. ISBN 978-80-7385-210-8.
- [13] Fenol 3D Model C₆H₅OH 3D model. Online. In: 3D Models for Free. 2020. Dostupné z: <https://free3d.com/tr/3d-model/phenol-3d-model-c6h5oh-2802.html>. [cit. 2024-02-08].
- [14] SUTTO, Thomas E. Structure of formaldehyde, acrylonitrile and acrolein. Online. In: ResearchGate. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-formaldehyde-acrylonitrile-and-acrolein_fig19_322721196. [cit. 2024-02-08].
- [15] HEJTMÁNEK, Petr; NAJMANOVÁ, Hana a POKORNÝ, Marek. Požární odolnost stavebních konstrukcí. Online. Tzb-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13655-pozarni-odolnost-stavebnich-konstrukci>. [cit. 2024-02-10].
- [16] MOST, Jean-Michel a CHAMPION, Michel. Fire Resistance of Aeronautical Composite Materials under Reduced Pressure Conditions. Online. EUCASS. 2019, roč. 2019, s. 14. Dostupné z: <https://doi.org/10.13009/EUCASS2019-193>. [cit. 2024-02-10].
- [17] PETROVÁ, Šárka; SOUDEK, Petr a VANĚK, Tomáš. Retardanty hoření, jejich použití a vliv na životní prostředí. *Chemické listy*. 2015, roč. 2015, č. 109, s. 679 - 686.
- [18] VAN DER VEEN, Ike a DE BOER, Jacob. Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis. *Chemosphere*. 2012, roč. 2012, č. 88, s. 1119-1153.
- [19] SPEIGHT, James G. *Environmental Organic Chemistry for Engineers*. Online. Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-12-804492-6. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2013-0-16021-7>. [cit. 2024-02-11].
- [20] WANG, Silong; DING, Hongyuan a XIE, Jianghui. A review on the suppression mechanism of typical flame retardants on the explosion of mine dust. Online. *Powder Technology*. 2023, roč. 2023, č. 427. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118762>. [cit. 2024-02-11].

- [21] SAPKOTA, Anupama. Aromatic vs Aliphatic Compounds- Definition, 15 Key Differences, Examples. Online. In: ARYAL, Sagar. Science Info. Dostupné z: <https://scienceinfo.com/aromatic-vs-aliphatic-compounds/>. [cit. 2024-03-24].
- [22] Regulatory Strategy for Flame Retardants. Online. Finsko: European Chemicals Agency, 2023. ISBN 978-92-9468-261-1. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.2823/854233>. [cit. 2024-02-11].
- [23] DE BOER, Jacob; HARRAD, Stuart a SHARKEY, Martin. The European Regulatory Strategy for flame retardants – The right direction but still a risk of getting lost. Online. Chemosphere. 2024, roč. 2024, č. 347. ISSN ISSN: 1879-1298. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140638>. [cit. 2024-02-11].
- [24] Polybromované difenylethery (PBDE). Online. ARNIKA, Z. S. Chráníme naše životní prostředí. Dostupné z: <https://arnika.org/pbde-polybromovane-difenylethery>. [cit. 2024-02-24].
- [25] Tetrabromobisphenol A. Online. In: Merck Czech republic. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/CZ/en/product/aldrich/330396>. [cit. 2024-02-24].
- [26] SHEN, Jingjing; LIANG, Jianwei; LIN, Xinfeng a LIN, Hongjian. The Flame-Retardant Mechanisms and Preparation of Polymer Composites and Their Potential Application in Construction Engineering. Online. Polymers. 2022, roč. 2022, č. 14. ISSN 20734360. Dostupné z: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, <https://doi.org/10.3390/polym14010082>. [cit. 2024-02-24].
- [27] Červený fosfor. Online. In: Periodická video tabulka prvků. Dostupné z: <https://www.chemickeprvky.cz/prvek/p/?novinka=85&modal>. [cit. 2024-02-25].
- [28] EREMINA, Tatiana a KOROLCHENKO, Dmitry. Fire Protection of Building Constructions with the Use of Fire-Retardant Intumescent Compositions. Online. Buildings. 2020, roč. 2020, č. 10. ISSN 2075-5309. Dostupné z: MDPI, <https://doi.org/10.3390/buildings10100185>. [cit. 2024-02-25].
- [29] TELES, Fernando; MARTINS, Gabriela a ANTUNES, Filipe E. Fire retardancy in nanocomposites by using nanomaterial additives. Online. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Roč. 2022, č. 163, article 105466. ISSN 1873-250X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105466>. [cit. 2024-02-25].

- [30] Ovonex vitaminy. Online. Vitaminy Ovonex. Dostupné z: <https://www.ovonex.cz/vitaminy/>. [cit. 2024-02-25].
- [31] Graphene Sheet 3D Model. Online. In: Free 3D. Dostupné z: <https://free3d.com/3d-model/graphene-sheet-8924.html>. [cit. 2024-03-29].
- [32] TAIB, Mohamad Nurul Azman Mohammad; ANTOV, Petar a SAVOV, Viktor. Current progress of biopolymer-based flame retardant. Online. Polymer Degradation and Stability. 2022, roč. 205, č. November 2022, article 110153. ISSN 1873-2321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110153>. [cit. 2024-05-01].
- [33] JEONG, Sun Hwan; PARK, Cheol Hyun a SONG, Hyewon. Biomolecules as green flame retardants: Recent progress, challenges, and opportunities. Online. Journal of Cleaner Production. 2022, č. 368, article 133241. ISSN 1879-1786. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133241>. [cit. 2024-03-24].
- [34] COSTES, Lucie; LAOUTID, Fouad a BROHEZ, Sylvain. Bio-based flame retardants: When nature meets fire protection. Online. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2017, roč. 2017, č. 117, s. 1-25. ISSN 1879-212X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mser.2017.04.001>. [cit. 2024-03-24].
- [35] WANG, Meiting; YIN, Guang-Zhong a JANG, Jüan. Bio-based flame retardants to polymers: A review. Online. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2023, roč. 6, č. 2, s. 132-155. ISSN 2542-5048. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.07.003>. [cit. 2024-03-24].
- [36] INAGAKI, Michio; TSUMURA, Tomoki a KINUMOTO, Tarou. Graphitic carbon nitrides (g-C₃N₄) with comparative discussion to carbon materials. Online. Carbon. 2019, roč. 141, s. 580-607. ISSN 1873-3891. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.09.082>. [cit. 2024-03-24].
- [37] SANTRA, Sumon; BOSE, Avigyan a MITRA, Koushik. Exploring two decades of graphene: The jack of all trades. Online. Applied Materials Today. 2024, roč. 36, č. February 2024, article 102066. ISSN 2352-9415. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102066>. [cit. 2024-03-29].
- [38] MAHMOOD, Zahed; YAMEEN, Muhammad a JAHANGEER, Muhammad. Lignin as Natural Antioxidant Capacity. Online. In: Lignin - Trends and Applications. 2018. ISBN

978-953-51-3902-7. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/59700>. [cit. 2024-05-08].

- [39] SAWPAN, Moyeenuddin Ahmad. Polyurethanes from vegetable oils and applications: a review. Online. Journal of Polymer Research. 2018, roč. 25, article 184. ISSN 1572-8935. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1578-3>. [cit. 2024-06-02].
- [40] BHASKARAN, Swathy Krishna; BOGA, Karteek; ARUKULA, Ravi a GADDAM, Sashivinay Kumar. Natural fibre reinforced vegetable-oil based polyurethane composites: a review. Online. Journal of Polymer Research. 2023, roč. 30, article 325. ISSN 1572-8935. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03703-9>. [cit. 2024-06-02].
- [41] CABULIS, Ugis a IVDRE, Aiga. Recent developments in the sustainability of the production of polyurethane foams from polyols based on the first- to the fourth-generation of biomass feedstock. Online. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2023, roč. 44, č. December 2023, article 100866. ISSN 2452-2236. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100866>. [cit. 2024-06-02].
- [42] WANG, Xiaohan; JANG, Jinwon a SU, Yanqun. Starting materials, processes and characteristics of bio-based foams: A review. Online. Journal of Bioresources and Bioproducts. 2024, roč. 9, č. May 2024, s. 160-173. ISSN 2369-9698. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2024.01.004>. [cit. 2024-06-02].
- [43] DE SOUSA, Maria Alexsandra a NASCIMENTO, Tassio Lessa. Cashew Nut Shell Liquid: A Versatile Raw Material Utilized for Syntheses of Phosphorus Compounds. Online. Energy Fuels. 2009, č. 23, s. 5432–5437. ISSN 0887-0624. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ef900585b>. [cit. 2024-06-07].
- [44] ECHEVERRIA-ALTUNA, Oihane; OLLO, Olatz a LARRAZA, Izaskun. Development of a Novel Biobased Polyurethane Resin System for Structural Composites. Online. Polymers. 2022, roč. 14, č. 21. ISSN 20734360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14214553>. [cit. 2024-06-02].
- [45] HU, Shengjun; LUO, Xiaolan a LI, Yebo. Polyols and Polyurethanes from the Liquefaction of Lignocellulosic Biomass. Online. ChemSusChem. 2014, roč. 7, č. 1, s. 66-72. ISSN 1864-564X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/cssc.201300760>. [cit. 2024-06-02].

- [46] MA, Xiaozhen; CHEN, Jing; ZHU, Jin a YAN, Ning. Lignin-Based Polyurethane: Recent Advances and Future Perspectives. Online. *Macromolecular Rapid Communications*. 2021, roč. 42, č. 3, article 2000492. ISSN 1521-3927. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/marc.202000492>. [cit. 2024-06-04].
- [47] HAI, Thien An Phung; TESSMAN, Marissa a NEELAKANTAN, Nitin. Renewable Polyurethanes from Sustainable Biological Precursors. Online. *Biomacromolecules*. 2021, roč. 22, č. 5, s. 1770-1794. ISSN 1525-7797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c01610>. [cit. 2024-06-04].
- [48] ARAUJO, Thayli Ramires; BRESOLIN, Daniela a . Conventional lignin functionalization for polyurethane applications and a future vision in the use of enzymes as an alternative method. Online. *European Polymer Journal*. 2023, roč. 188, article 111934. ISSN 1873-1945. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.111934>. [cit. 2024-06-04].
- [49] Global Bio-based Polyurethane Market: By Product Type (Rigid Foam, Flexible Foam, and Other Product Types), By End-Use (Automotive, Consumer Goods, and Other End-Uses) as well as By Region and Companies - Industry Segment Outlook, Market Assessment, Competition Scenario, Trends and Forecast: 2024-2033. Online. In: *Market.us*. 2023. Dostupné z: <https://market.us/report/bio-based-polyurethane-market/>. [cit. 2024-06-11].
- [50] MNGOMEZULU, Mfiso E.; JOHN, Maya J. a JACOBS, Valencia. Review on flammability of biofibres and biocomposites. Online. *Carbohydrate Polymers*. 2014, roč. 111, s. 149-182. ISSN 0144-8617. Dostupné z: <https://doi.org/j.carbpol.2014.03.071>. [cit. 2024-06-13].
- [51] BO, Liu; HUA, Gong a XIAN, Ji. Recent remediation strategies for flame retardancy via nanoparticles. Online. *Chemosphere*. 2024, roč. 354, article 141323. ISSN 1879-1298. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141323>. [cit. 2024-06-13].
- [52] PNG, Zhuang Mao; DEBBIE SOO, Xiang Yun a CHUA, Ming Hui. Strategies to reduce the flammability of organic phase change Materials: A review. Online. *Solar Energy*. 2022, roč. 231, č. January, s. 115-128. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.057>. [cit. 2024-06-13].

- [53] ANIZA, Ria; CHEN, Wei-Hsin a . Lignocellulosic biofuel properties and reactivity analyzed by thermogravimetric analysis (TGA) toward zero carbon scheme: A critical review. Online. Energy Conversion and Management: X. 2024, roč. 22, č. April 2024, article 100538. ISSN 2590-1745. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100538>. [cit. 2024-06-15].
- [54] BACH, Quang-Vu a CHEN, Wei-Hsin. Pyrolysis characteristics and kinetics of microalgae via thermogravimetric analysis (TGA): A state-of-the-art review. Online. Bioresource Technology. 2017, roč. 246, s. 88-100. ISSN 1873-2976. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.087>. [cit. 2024-06-15].
- [55] DE, Bibekananda; BERA, Madhab a BHATTACHARJEE, Debashish. A comprehensive review on fiber-reinforced polymer composites: Raw materials to applications, recycling, and waste management. Online. Progress in Materials Science. 2024, roč. 146, č. December 2024, article 101326. ISSN 1873-2208. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101326>. [cit. 2024-08-31].
- [56] SUN, Zhaoling; LUO, Yuxin a CHEN, Chaoyu. Mechanical enhancement of carbon fiber-reinforced polymers: From interfacial regulating strategies to advanced processing technologies. Online. Progress in Materials Science. 2024, roč. 142, č. April 2024, article 101221. ISSN 1873-2208. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101221>. [cit. 2024-08-31].
- [57] SUKANTA, Das a YOKOZEKI, Tomohiro. A brief review of modified conductive carbon/glass fibre reinforced composites for structural applications: Lightning strike protection, electromagnetic shielding, and strain sensing. Online. Composites Part C: Open Access. 2021, roč. 5, č. July 2021, article 100162. ISSN 2666-6820. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100162>. [cit. 2024-08-31].
- [58] PITTO, Maximilian; FIEDLER, Holger a KIM, Nam Kyeun. Carbon fibre surface modification by plasma for enhanced polymeric composite performance: A review. Online. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2024, roč. 180, č. May 2024, article 108087. ISSN 1878-5840. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108087>. [cit. 2024-09-15].
- [59] ZHANG, Jingjing a DUAN, Yugang. Interfacial enhancement for carbon fibre reinforced electron beam cured polymer composite by microwave irradiation. Online.

Polymer. 2020, roč. 2020, č. 192, article 122327. ISSN 0032-3861. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122327>. [cit. 2024-09-15].

- [60] BAUER, Matthias; BERATZ, Sergej a RUHLAND, Klaus. Anodic oxidation of carbon fibers in alkaline and acidic electrolyte: Quantification of surface functional groups by gas-phase derivatization. Online. Applied Surface Science. 2020, roč. 2020, č. 506, article 144947. ISSN 1873-5584. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144947>. [cit. 2024-09-15].
- [61] JAGADEESH, Praveenkumara; RANGAPPA, Sanjay Mavinkere a SIENGCHIN, Suchart. Basalt fibers: An environmentally acceptable and sustainable green material for polymer composites. Online. Construction and Building Materials. 2024, roč. 2024, č. 436, article 136834. ISSN 1879-0526. [cit. 2024-09-17].
- [62] BI, Mengxin; QIN, Qian a DENG, Bowen. Natural fibers as sustainable and renewable materials for green sample preparation. Online. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2024, roč. 2024, č. 180, article 117894. ISSN 1879-3142. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117894>. [cit. 2024-09-19].
- [63] ELFALEH, Issam a ABBASSI, Fethi. A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. Online. Results in Engineering. 2023, roč. 2023, č. 19, article 101271. ISSN 2590-1230. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>. [cit. 2024-09-19].
- [64] Konopné lano (40mm) (Zdroj: <https://prevadzkaren.sk>). Online. In: PREVADZKAREN.sk. Dostupné z: <https://prevadzkaren.sk/obchod/konopne-lano-40mm/>. [cit. 2024-09-19].
- [65] HETIMY, Sulava; MEGAHED, Naglaa a ELEINEN, Osama Abu. Exploring the potential of sheep wool as an eco-friendly insulation material: A comprehensive review and analytical ranking. Online. Sustainable Materials and Technologies. 2024, roč. 2024, č. 39, article e00812. ISSN 2214-9929. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00812>. [cit. 2024-09-19].
- [66] TALABI, Segun I.; ISMAIL, Sikiru O. a AKPAN, Emmanuel I. Quest for environmentally sustainable materials: A case for animal-based fillers and fibers in polymeric biocomposites. Online. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2024, roč. 2024, č. 183, article 108216. ISSN 1878-5840. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108216>. [cit. 2024-09-19].

- [67] YILMAZ, Sefa; THEODORE, Merlin a OZCAN, Soydan. Silicon carbide fiber manufacturing: Cost and technology. Online. *Composites Part B: Engineering*. 2024, roč. 2024, č. 269, article 111101. ISSN 1879-1069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111101>. [cit. 2024-09-20].
- [68] SiC Fibers for High-Performance Composites. Online. In: HENAN SUPERIOR ABRASIVES. SiC Fibers for High-Performance Composites. Dostupné z: <https://www.silicon-carbides.com/blog/sic-fibers.html>. [cit. 2024-09-20].
- [69] Rohseide: Bildnummer 12526163. Online. In: Science Photo Library. Dostupné z: <https://www.science-photo.de/bilder/12526163-Rohseide>. [cit. 2024-09-21].
- [70] SREEHARI, H.; GOPIKA, Venu; JAYAN, Jitha S.; SETHULEKSHMI, A. S. a SARITHA, Appukuttan. A comprehensive review on bio epoxy based IPN: Synthesis, properties and applications. Online. *Polymer*. 2022, roč. 2022, č. 252, article 124950. ISSN 1873-2291. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124950>. [cit. 2025-03-01].
- [71] RAD, Elaheh Rohani; VAHABI, Henri a DE ANDA, Agustin Rios. Bio-epoxy resins with inherent flame retardancy. Online. *Progress in Organic Coatings*. 2019, roč. 2019, č. 135, s. 608-612. ISSN 0300-9440. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.046>. [cit. 2025-03-01].
- [72] EBRAHIMNEZHAD-KHALJIRI, Hossein a GHADI, Aliakbar. Recent advancement in synthesizing bio-epoxy nanocomposites using lignin, plant oils, saccharides, polyphenols, and natural rubbers: A review. Online. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024, roč. 2024, č. 256, part I, article 128041. ISSN 1879-0003. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128041>. [cit. 2025-03-01].
- [73] MARRIAM, Fareeha; IRSHAD, Adnan a UMER, Isra. Vegetable oils as bio-based precursors for epoxies. Online. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2023, roč. 2023, č. 31, article 100935. ISSN 2352-5541. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100935>. [cit. 2025-03-01].
- [74] AĞCAN, Arif Emre a KARTAL, İlyas. A review of waste-derived fillers for enhancing the properties of epoxy resins. Online. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2025, roč. 2025, č. 138, article 103944. ISSN 0143-7496. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.103944>. [cit. 2025-03-01].

- [75] CHONG, K. L.; LAI, J. C. a RAHMAN, R. A. A review on recent approaches to sustainable bio-based epoxy vitrimer from epoxidized vegetable oils. Online. *Industrial Crops and Products*. 2022, roč. 2022, č. 189, article 115857. ISSN 1872-633X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115857>. [cit. 2025-03-01].
- [76] ZHANG, Yuan; LIU, Xuemei a WAN, Mengting. From renewable biomass to bio-based epoxy monomers and bio-based epoxy curing agents: Synthesis and performance. Online. *Polymer Degradation and Stability*. 2024, roč. 2024, č. 229, article 110988. ISSN 0141-3910. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110988>. [cit. 2025-03-01].
- [77] LAVAUX, Valentine a LALEVÉE, Jacques. Epoxy curing in mild and eco-friendly conditions: Towards bisphenol A-free systems. Online. *Progress in Polymer Science*. 2024, roč. 2024, č. 157, article 101873. ISSN 0079-6700. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2024.101873>. [cit. 2025-03-01].
- [78] PAPPA, Christina; FEGHALI, Elias a VANBROEKHOVEN, Karolien. Recent advances in epoxy resins and composites derived from lignin and related bio-oils. Online. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2022, roč. 2022, č. 38, article 100687. ISSN 2452-2236. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100687>. [cit. 2025-03-01].
- [79] *Phthalic Anhydride*. Online. In: OCHRE DIGI MEDIA PVT LTD. Pharmaceaulical Tech. Dostupné z: <https://www.pharmaceutical-tech.com/products/i-g-petrochemicals-ltd/phthalic-anhydride>. [cit. 2025-03-02].
- [80] Vacuum Infusion Process – Benefits, Dry Spots, Pinholes and More. German Advanced Composites [online]. 2021 [cit. 2025-03-23]. Dostupné z: <https://german-advanced-composites.com/vacuum-infusion-process-explained>.
- [81] RUSNÁKOVÁ, Soňa. Přednášky z předmětu Zpracovatelské inženýrství kompozitů. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019.
- [82] CARDOLITE CORPORATION. FormuLITE™ Amine-Cured Epoxy Systems. Online. CARDOLITE CORPORATION. Innovative Specialty Chemicals Products. Dostupné z: <https://www.cardolite.com/products/formulite/>. [cit. 2025-03-23].
- [83] ČSN EN ISO 527-1, *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

- [84] ČSN EN ISO 527-4, *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [85] BEDNAŘÍK, Martin. *Přednášky z předmětu Nauka o materiálu II*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019.
- [86] HLUCHÝ, Miroslav a KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1 - 1. díl*. 4. revidované vydání. NAKLADATELSTVÍ SCIENTIA, spol. s r.o., 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [87] ČSN EN ISO 180, *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2024.
- [88] Laser CO2. Online. In: UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. Centrum polymerních systémů UTB Zlín. Dostupné z: <https://cps.utb.cz/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni/zpracovatelstvi-plastu/laser-co2>. [cit. 2025-04-25].
- [89] *Monoammonium Phosphate*. Online. AHA INTERNATIONAL CO., LTD. China Active Pharmaceutical Ingredients, Food Ingredients, Nutrition and Health Product Manufacturers, Suppliers, Factory. Dostupné z: <https://www.ahabiochem.com/food-ingredients/phosphates/monoammonium-phosphate.html>. [cit. 2025-04-05].
- [90] ČSN EN ISO 14125, *Vlákny vyztužené plastové kompozity – Stanovení ohybových vlastností*. Český normalizační institut, 1999.
- [91] PAVLÍNEK, Vladimír. Termické analýzy. Studijní texty z předmětu Kontrolní a zkušební metody [online]. [cit. 2025-03-29]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Dostupné z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_06.pdf
- [92] ING. PETR ŠVEC – PENTA S.R.O. *Dihydrogenfosforečnan amonný p.a. 1000 g (12280-31000)*. Online. ING. PETR ŠVEC – PENTA S.R.O. PENTA - Výrobce a dodavatel čistých, laboratorních, farmaceutických a speciálních chemikálií. Dostupné z: <https://www.pentachemicals.eu/chemikalie/dihydrogenfosforecnan-amonny-54/12280-31000>. [cit. 2025-04-05].
- [93] Bezpečnostní list: Dihydrogenfosforečnan amonný ≥ 99 %, p.a., ACS. Online. CARL ROTH GMBH + CO. KG. 18.10.20216. Dostupné z: https://onlinefolders.abra.eu/PLAB/BL_P727_20201015_DIHYDROGENFOSFORECNAN_AMONNY_min_99_FSQ5200101.pdf. [cit. 2025-04-05].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Hlavní mezní stavy: a) R – únosnost a stabilita, b) E – celistvost, c) I – izolační schopnost, d) W – omezení sálání	17
Obrázek 2 Složení vrstev vnějšího pláště letadel.....	19
Obrázek 3 Trojúhelník hoření.....	20
Obrázek 4 Pyrolýza polymeru při hoření.....	21
Obrázek 5 Znázornění molekul akrylonitrilu a formaldehydu	23
Obrázek 6 Znázornění molekuly fenolu	24
Obrázek 7 Příklady výrobků s retardanty hoření	25
Obrázek 8 Příklad aromatické a alifatické molekuly	28
Obrázek 9 Znázornění tetrabromdisfenolu A (TBBPA).....	28
Obrázek 10 Červený fosfor.....	31
Obrázek 11 Materiál s intumescentním retardantem po požáru	33
Obrázek 12 Grafen.....	35
Obrázek 13 Mechanismus zpomalování hoření BP a g-C ₃ N ₄	36
Obrázek 14 Znázornění celulóзовého vlákna.....	37
Obrázek 15 Chemická struktura ligninu	39
Obrázek 16 Chemická struktura chitosanu	40
Obrázek 17 Struktura epoxidové pryskyřice na bázi bisfenolu A	41
Obrázek 18 Epoxidační reakce sójového oleje	42
Obrázek 19 Ftalanhydrid (anhydrid kyseliny ftalové)	44
Obrázek 20 Princip frontální polymerace	46
Obrázek 21 Redoxní systém na bázi kovu.....	47
Obrázek 22 Globální trh s bio-polyuretanem – podíl na trhu v roce 2023 dle oblasti využití	48
Obrázek 23 Chemická struktura tekutiny ze skořápek kešu ořechů	52
Obrázek 24 Tvorba polyhydroxyuretanu reakcí mezi cyklohličitánem a aminem	53
Obrázek 25 Struktura rostlinného vlákna	55
Obrázek 26 a) rostlina Agave sisalana, b) sisalová vlákna.....	57
Obrázek 27 Konopné lano	58
Obrázek 28 Snímek hedvábného vlákna ze SEM.....	60
Obrázek 29 Struktura vlněných vláken.....	61
Obrázek 30 Technologie zvláknovací trysky.....	63
Obrázek 31 Technologie Junkers.....	63
Obrázek 32 Tkanina z vláken karbidu křemíku.....	65

Obrázek 33 Schématické znázornění rozhraní vlákno-matice v kompozitu.....	66
Obrázek 34 Schéma anodické oxidace vláken.....	67
Obrázek 35 Schéma kuželového kalorimetru	71
Obrázek 36 Test UL-94 a) horizontální b) vertikální	73
Obrázek 37 Zkušební zařízení LOI.....	74
Obrázek 38 Struktura zvolené lněné tkaniny	79
Obrázek 39 Dihydrogenfosforečnan amonný ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$).....	80
Obrázek 40 Schéma technologie vakuové infuze	81
Obrázek 41 Separační vosk M-700/C	83
Obrázek 42 Připravena forma pro výrobu semiprojektu pro DMA.....	84
Obrázek 43 Systém Cardolite® – vlevo epoxidová pryskyřice 2501A, vpravo vytvrzovací aminové činidlo 2401B	85
Obrázek 44 Výsledky DMA	87
Obrázek 45 Výsledky DMA	88
Obrázek 46 Lněná tkanina pro vážení.....	89
Obrázek 47 Grafické vyjádření závislosti průměrného navýšení hmotnosti tkaniny na koncentraci vodného roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	91
Obrázek 48 Namáčení lněné tkaniny ve vodném roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	92
Obrázek 49 Připravena forma pro impregnaci pryskyřicí.....	93
Obrázek 50 Modifikace při výrobě semiprojektu s příměsí práškového retardantu v systému 2502A + 2401B vakuovou infuzí.....	96
Obrázek 51 Usazené částice práškového retardantu z pryskyřice	97
Obrázek 52 Výztuž ručně prosycená matricí 2501A+2401B s příměsí retardantu.....	98
Obrázek 53 Výztuž ručně prosycená matricí 2502A+2401B s příměsí retardantu pod vakuem	98
Obrázek 54 Grafické znázornění post processu	99
Obrázek 55 Schéma variant rázové zkoušky houževnatosti Izod	101
Obrázek 56 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu I.....	104
Obrázek 57 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu II	105
Obrázek 58 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu III	106
Obrázek 59 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu IV	107
Obrázek 60 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu V	108
Obrázek 61 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu VI.....	109
Obrázek 62 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu VII.....	110
Obrázek 63 Grafické vyjádření výsledků Izod pro Variantu VIII	111
Obrázek 64 Grafické vyjádření průměrných hodnot rázové houževnatosti pro varianty systémů s pryskyřicí 2501A.....	112

Obrázek 65 Grafické vyjádření průměrných hodnot rázové houževnatosti pro varianty systémů s pryskyřicí 2502A.....	113
Obrázek 66 Schéma zkoušky v ohybu.....	114
Obrázek 67 Zkušební stroj Testometric M350-5CT.....	115
Obrázek 68 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty I.....	117
Obrázek 69 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty II	118
Obrázek 70 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty III.....	119
Obrázek 71 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty IV.....	120
Obrázek 72 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty V	121
Obrázek 73 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty VI.....	122
Obrázek 74 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty VII	123
Obrázek 75 Průběh zkoušky ohybem pro vzorky Varianty VIII	124
Obrázek 76 Grafické vyjádření dosažených průměrných hodnot zkouškou ohybem pro varianty s pryskyřicí 2501A.....	125
Obrázek 77 Grafické vyjádření dosažených průměrných hodnot zkouškou ohybem pro varianty s pryskyřicí 2502A.....	126
Obrázek 78 Porušená zkušební tělesa po provedení zkoušky ohybem.....	127
Obrázek 79 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu 1	129
Obrázek 80 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu II.....	130
Obrázek 81 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu III	131
Obrázek 82 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu IV	132
Obrázek 83 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu V	133
Obrázek 84 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu VI.....	134
Obrázek 85 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu VII.....	135
Obrázek 86 Průběh HRR v závislosti na čase pro Variantu VIII	136
Obrázek 87 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2501A.....	137
Obrázek 88 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2501A – doba do vznícení a uhašení plamene	138
Obrázek 89 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2502A.....	139
Obrázek 90 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2502A – doba do vznícení a uhašení plamene	140

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozdělení tříd reakce na oheň.....	15
Tabulka 2 Rozdělení tříd nebezpečnosti hořlavých kapalin	16
Tabulka 3 Teplota vznícení vybraných látek	17
Tabulka 4 Přehled některých polymerů a toxických látek vznikající jejich spalováním.....	22
Tabulka 5 Návrh kombinací materiálů pro experiment	76
Tabulka 6 Vybrané vlastnosti systému Cardolite® FormuLITE 2501A + 2401B	78
Tabulka 7 Vybrané vlastnosti systému Cardolite® FormuLITE 2502A + 2401B	78
Tabulka 8 Vybrané vlastnosti dihydrogenfosforečnanu amonného.....	80
Tabulka 9 Výsledky vážení namáčených tkanin ve vodním roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	90
Tabulka 10 Přepočet navýšení hmotnosti namáčené lněné tkaniny ve vodním roztoku $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	90
Tabulka 11 Přehled hmotností namáčené lněné tkaniny ve vodných roztocích $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	93
Tabulka 12 Stanovení podílu výztuže a matrice v destičce o rozměrech 100 x 100 mm	94
Tabulka 13 Stanovení podílu výztuže a matrice v destičce o rozměrech 200 x 300 mm	94
Tabulka 14 Stanovení podílu výztuže a matrice v destičce o rozměrech 200 x 300 mm	95
Tabulka 15 Stanovení podílu výztuže a matrice v destičce o rozměrech 200 x 300 mm	95
Tabulka 16 Výsledky Izod pro 2501A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta I	103
Tabulka 17 Výsledky Izod pro 2502A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta II.....	104
Tabulka 18 Výsledky Izod pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina namáčena v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta III	105
Tabulka 19 Výsledky Izod pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina namáčena v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta IV	106
Tabulka 20 Výsledky Izod pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta V	107
Tabulka 21 Výsledky Izod pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VI	108
Tabulka 22 Výsledky Izod pro 2501A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VII	109
Tabulka 23 Výsledky Izod pro 2502A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VIII	110
Tabulka 24 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti pro systém pryskyřice 2501A.....	112
Tabulka 25 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti pro systém pryskyřice 2502A.....	113
Tabulka 26 Výsledky zkoušky ohybu pro 2501A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta I	117

Tabulka 27 Výsledky zkoušky ohybu pro 2502A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta II.....	118
Tabulka 28 Výsledky zkoušky v ohybu pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina namáčena v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta III.....	119
Tabulka 29 Výsledky zkoušky v ohybu pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina namáčena v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta IV	120
Tabulka 30 Výsledky zkoušky v ohybu pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta V.....	121
Tabulka 31 Výsledky zkoušky v ohybu pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VI	122
Tabulka 32 Výsledky zkoušky ohybu pro 2501A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VII	123
Tabulka 33 Výsledky zkoušky ohybu pro 2502A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VIII.....	124
Tabulka 34 Průměrné hodnoty výsledků zkoušky ohybem u systémů s pryskyřicí 2501A	125
Tabulka 35 Průměrné hodnoty výsledků zkoušky ohybem u systémů s pryskyřicí 2502A	126
Tabulka 36 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2501A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta I	128
Tabulka 37 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2502A bez retardantu, tkanina namáčena ve 20 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta II.....	129
Tabulka 38 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina namáčena v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta III.....	130
Tabulka 39 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina namáčena v 11,7 hm% roztoku retardantu v demineralizované vodě – Varianta IV	131
Tabulka 40 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2501A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta V.....	132
Tabulka 41 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2502A s příměsí retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VI	133
Tabulka 42 Výsledky zkoušky ohybu pro 2501A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VII	134
Tabulka 43 Výsledky zkoušky hořlavosti pro 2502A bez retardantu, tkanina bez retardantu – Varianta VIII.....	135
Tabulka 44 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2501A	136
Tabulka 45 Srovnání výsledků zkoušky hořlavosti pro systémy na bázi 2502A	139

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CO	oxid uhelnatý
HCN	kyanovodík
CH ₂ O	formaldehyd
HCl	chlorovodík
SO ₂	oxid siřičitý
PVC	polyvinylchlorid
PA	polyamid
PUR	polyuretan
COCl ₂	fosgen
-C≡N	nitrilová skupina
PAN	polyakrylonitril
ABS	akrylonitril-butadien-styren
CH ₂ O	formaldehyd
C ₆ H ₅ OH	fenol
-OH	hydroxylová skupina
HBr	bromovodík
FR	Flame Retardants
TBBPA	Tetrabromdisfenol A
PBDE	polybromované difenylethery
REACH	Registration Evaluation Authorisation and Restriction of Chemicals
Al(OH) ₃	hydroxid hlinitý
ATH	Aluminium Trihydroxide
Mg(OH) ₂	hydroxid hořečnatý
MDH	Magnesium Dihydroxide
hm%	hmotnostní procento

APP	Ammonium Polyphosphate
NP	nanoplniva
MMT	montmorillonit
ZnO	oxid zinečnatý
Fe	železo
-COOH	karboxylová skupiny
C=O	karbonylová skupina
GNP	Graphene Nanoplatelets
GO	oxid grafenu
BP	Black Phosphorus
g-C ₃ N ₄	grafitický nitrid uhlíku
CH ₄ N ₂ O	močovina, diamid kyseliny uhličitě
CES	Chicken Eggshell
CaCO ₃	uhličitan vápenatý
MgCO ₃	uhličitan hořečnatý
Ca ₃ (PO ₄) ₂	fosforečnan vápenatý
CaO	oxid vápenatý
VO	Vegetable Oils
NIPU	neizokyanátový polyuretan
PHU	polyhydroxyuretan
CNSL	Cashew Nut Shell Liquid
KOH	hydroxid draselný
DGEBA	Diglycidyl Ether of Bisphenol A
HRR	Heat Release Rate
PHRR	Peak Heat Release Rate
TTI	Time to Ignition

LOI	Limiting Oxygen Index
PCFC	Pyrolysis combustion flow calorimetry
SEM	skenovací elektronový mikroskop
CVD	chemická depozice z plynné fáze
CVI	chemická infiltrace par
R-LCVD	rychlá laserem podporovaná chemická depozice z plynné fáze
TGA	termogravimetrická analýza
ICP	Intrinsically Conductive Polymers
DVB	divinylbenzen
PANI	polyvanilin
MWI	Microwave Irradiation
EPD	elektroforetická depozice
NH ₃	amoniak
He	helium
N	dusík
H	vodík
BF	Basalt Fibres
MPa	megapascal
GPa	gigapascal
CMC	kompozit vyztužený vlákny karbidu křemíku
NH ₄ H ₂ PO ₄	dihydrogenfosforečnan amonný
DMA	dynamická mechanická analýza
b	šířka zkušebního tělesa pro zkoušky mechanických vlastností
h	šířka zkušebního tělesa pro zkoušky mechanických vlastností
J	joule
kJ	kilojoule

W	energie spotřebovaná při přeražení tělesa v rámci zkoušky Izod
a_k	rázová houževnatost
S.D.	směrodatná odchylka

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list FormuLITE 2501A + FormuLITE 2401B

Příloha P II: Materiálový list FormuLITE 2502A + FormuLITE 2401B

Příloha P III: Materiálový list $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Příloha P IV: Výstupní soubor Izod_2-75J_ISO-180.zs2 ze softwaru TestXpert při zkoušce
rázové houževnatosti

Příloha P V: Výstupní soubory ze softwaru Test Analysis 5.0.30 při zkoušce ohybem

Příloha P VI: Výstupní soubory ze softwaru ConeCalc v6.5a software při zkoušce
hořlavosti

Příloha P VII: Výstupní grafy DMA