

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ



Fakulta lesnická
a dřevařská

Systém ochrany dřeva pro aglomerované materiály
modifikací retardérem hoření

Wood protection system for agglomerated materials by modification
with flame retardant

Disertační práce

v programu

Protipožární ochrana lesa, dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva

Autor: Ing. Tomáš Holeček

Školitel: Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

Praha
2026

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Tomáš Holeček

Protipožární ochrana lesa, dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva

Název práce

Systém ochrany dřeva pro aglomerované materiály modifikací retardérem hoření

Název anglicky

Wood protection system for agglomerated materials modified by fire retardant

Cíle práce

Cílem práce je vyvinout vhodný systém modifikace aglomerovaného materiálu na bázi překližovaného dřeva pro nekonstrukční a konstrukční aplikace retardérem hoření pro zvýšení bariérového efektu požární odolnosti a zároveň zachovat vhodné vlastnosti pro použití standardních lepicích procesů.

dílčí cíle:

- Stanovení vlivu retardéru na povrch materiálu z hlediska jeho adheze vzhledem ke standardním druhům adheziva.
- Stanovení hloubky penetrace různých retardérů hoření a jejich vliv na strukturu dřeva.
- Vliv vybraných retardérů hoření v aglomerovaných překližovaných materiálech na rychlost šíření požáru.
- Vliv vybraných retardérů hoření v aglomerovaném materiálu na mechanické vlastnosti výsledného produktu.

Metodika

K dosažení cíle práce vede vědecká metoda, která je složena z dílčích částí. V první fázi budou analyzovány parametry retardérů hoření a adheziv, které byly stanoveny na základě výsledků literární rešerše jako vhodné pro aplikace na dřevo a materiály na jeho bázi. Prostřednictvím laboratorních analýz budou charakterizovány parametry vybraných retardérů hoření na bázi anorganických solí, konkrétně kyslíkatých sloučenin boru a fosforečnanů amonných, které představují klíčové systémy pro potlačení hořlavosti lignocelulósových materiálů. Sledovány budou jejich specifické termické vlastnosti, mechanismy účinku a interakce v kompozitních systémech, což umožní obecné zhodnocení jejich efektivnosti při eliminaci hoření a šíření plamene. Pro experimenty budou vybrána adheziva primárně schválena pro konstrukční aplikace, tedy polyuretanová adheziva (řazená do třídy odolnosti D3 nebo D4) a adheziv na bázi formaldehydu (melamin-formaldehydové, fenol-formaldehydové) (řazená do třídy odolnosti D3 nebo D4) pro stanovení a ověření jejich účinnosti. Prostřednictvím metod laboratorní termické analýzy budou stanoveny charakteristiky termomechanických reakcí daných retardérů a adheziv v jednotlivých teplotních oblastech, a to sledováním změn tepelného toku při definovaném teplotním programu pro přesné určení parametrů teploty bodu zesklnění, teploty tavení a teplotního pole exotermického rozkladu. Prostřednictvím obecných metod laboratorní termické a gravimetrické analýzy budou stanoveny charakteristiky změny stavu retardéru a adheziva, konkrétně změna hmotnosti v závislosti na teplotě a čase v definované atmosféře, což

umožní optimalizovat interakci daného systému retardéru hoření s vybraným adhezivem. V druhé fázi bude stanovena míra hloubky penetrace různých retardérů hoření a jejich vliv na strukturu dřeva, kdy vliv intenzity penetrace ovlivňuje efektivnost eliminace hoření a šíření plamene po povrchu. Dále budou stanoveny a ověřeny pevnostní parametry aglomerovaného materiálu zkouškou tříbodového ohybu dle ČSN EN 310. Budou zkoumány a ověřovány závislosti typu systému retardéru, adheziva a parametrů užitého dřeva ve vyvinutém materiálu; bude stanoven vztah kouřivosti k viditelnosti a požární bezpečnosti. Charakteristika rychlosti šíření plamene po povrchu vyvinutého aglomerovaného překližovaného materiálu bude stanovena na základě testu dle ISO 5658-2. Na základě závislosti rychlosti uvolňování tepla a rychlost produkce kouře bude interpretována výsledná rychlost ztráty hmoty materiálu hořením, která bude porovnána k referenci. Ve čtvrté fázi bude analyzován a ověřován vliv vybraných retardérů hoření implementovaných do aglomerovaných materiálů na mechanické vlastnosti výsledného produktu. Výsledné materiály budou určeny jak pro nekonstrukční, tak i pro konstrukční aplikace.



Doporučený rozsah práce

120-140 stran bez příloh

Klíčová slova

Aglomerovaný materiál, adhezivum, retardér hoření, pevnost

Doporučené zdroje informací

- Bahrami, M., Abenojar, J., Martínez, M. Á. (2020). Recent Progress in Hybrid Biocomposites: Mechanical Properties, Water Absorption, and Flame Retardancy. *Materials* 13 (22). 5145.
- Cao, Y., Yu, S., Wang, Z., Wang, J. (2022). Interfacial gluing strategy derived closely-coupled ternary LDH P-RGO nanohybrid towards constructing fire-safe epoxy resin. *Polymer Degradation and Stability* 205(110130).
- Guo, Y., Rong, H., Yu, Y., Chen, T., Chen, Z., Suo, Y., Jiang, J. (2022). A facile method for synthesis of novel phenyl phosphates flame retardants and their application in epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science* 139(44)(53100).
- Hussein, R., Denzli, N. (2005). The effects of fire retardant treatments on mechanical properties of wood and wood composites. *Wood Research* 50(3), 85-94.
- Lee, J., Park, J. H., Shim, S. B., Lee, J. E. (2022). Mechanical properties of polypropylene-based flame retardant composites by surface modification of flame retardants. *Polymers* 14(17)(3524).
- Liang, Y., Jian, H., Deng, Ch., Xu, J., Liu, Y., Park, H., Wen, M., Sun, Y. (2023). Research and Application of Biomass-Based Wood Flame Retardants: A Review. *Polymers* 15(950).
- Lin, C. F., Zhang, C., Karlsson, O., Martinka, J., Mantanis, G. I., Rantuch, P., Sandberg, D. (2023). Phytic Acid-Silica System for Imparting Fire Retardancy in Wood Composites. *Forests* 14(5)(1021).
- Li, S., Wang, X., Chen, T., Xu, M., Liu, L., Gao, S., Li, B. (2022). Effects of a composite flame retardant system on the flame retardancy and mechanical performance of epoxy resin adhesive. *Journal of Vinyl and Additive Technology* 28(4), 775-787.
- Lublóy, É., Takács, L., Enczel, D. I., Cimer, Z. (2021). Cimer Examination of the effect of fire retardant materials on timber. *Journal of Structural Fire Engineering*. ISSN: 2040-2317.
- Petrová, Š., Soudek, P., Vaněk, T. (2015). Retardanty hoření, jejich použití a vliv na životní prostředí. *Chemické listy* 109. 679-686.

Předběžný termín

2025/26 LS – FLD – Obhajoba DisP

Vedoucí práce

Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 23. 08. 2023

Ing. Radek Rinn, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 08. 2023

prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Předseda oborové rady

Elektronicky schváleno dne 03. 01. 2025

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 14. 07. 2026

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Systém ochrany dřeva pro aglomerované materiály modifikací retardérem hoření“ vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Dále prohlašuji, že jsem při přípravě práce využíval aplikace umělé inteligence (AI) výhradně pro kontrolu pravopisu a pro úpravu obrázků.

Jsem si vědom, že na moji disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním disertační práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souladu s GDPR.

V Praze dne 10.06.2026

Ing. Tomáš Holeček

Poděkování

Rád bych touto cestou upřímně poděkoval svému školiteli Ing. Přemyslu Šedivkovi, Ph.D., za odborné metodické vedení, podnětné rady a cenné informace při zpracování této disertační práce.

Velké poděkování patří Fakultě lesnické a dřevařské, zejména jejímu vedení, za zajištění kvalitního-akademického zázemí a poskytnutí moderního přístrojového vybavení, které jsem mohl pro řešení disertační práce plně využít. Stejně tak děkuji všem kolegům z Katedry zpracování dřeva a biomateriálů za jejich cenné rady, ochotu a podporu v průběhu celého doktorského studia.

Vypracování disertační práce bylo umožněno také díky materiální podpoře společnosti Wotan Forest, a.s. Za cenné odborné rady a konzultace upřímně děkuji řediteli panu Ing. Michalu Polákovi a hlavnímu technologovi panu Ing. Josefu Sečkářovi z provozu ALFA Solnice.

V neposlední řadě patří hluboké poděkování mé rodině za jejich neustálou trpělivost a podporu, stejně jako mým přátelům a všem, kteří mě úspěšně provázeli po celou dobu studia.

Abstrakt

Předkládaná disertační práce se zabývá uceleným vývojem a optimalizací materiálového systému protipožární ochrany velkoplošných aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Výchozím problémem je nepříznivá klasifikace standardních aglomerovaných a překližovaných materiálů na bázi dřeva, které jsou běžně řazeny do tříd reakce na oheň E a F, což výrazně omezuje jejich využití do nosných a vícepodlažních konstrukcí moderních dřevostaveb. Cílem výzkumu bylo maximalizovat retardační účinnost systému v plynné i kondenzované fázi při současném zachování mechanické, technologické a strukturní celistvosti materiálové matrice ze smrkového dřeva (*Picea abies*). Experimentální část práce zahrnovala návrh, výrobu a multikriteriální testování specifických materiálových variant stavebních překližek o definované tloušťce. Protipožární modifikace byla realizována prostřednictvím hloubkové tlakové impregnace jednotlivých dýhových listů nebo cílenou adicí retardantů do adhezivních systémů. V rámci výzkumu byla analyzována účinnost jak syntetických prekurzorů dihydrogenfosforečnanu amonného ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), octanu draselného (CH_3COOK), dicyandiamidu ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$) a bezvodého síranu sodného (Na_2SO_4), tak i biogenního udržitelného bioretardéru v podobě průmyslového sulfátového černého louhu s vysokým podílem strukturního ligninu. Požární chování a kinetika hoření byly diagnostikovány pomocí kónické kalorimetrie (dle ISO 5660-1), jednokomorové zkoušky vývoje dýmu (dle ČSN EN ISO 5659-2) a zkoušky laterálního šíření plamene po svislých prvcích (dle ISO 5658-2). Vertikální zkouška šíření plamene byla doplněna vnitřními termočlánky typu K pro kontinuální záznam hloubkových teplotních profilů a analýzu izotermické prodlevy, tedy růstu teploty v důsledku odpačování vlhkosti u hranice 100 °C. Mechanická spolehlivost a tuhost ohořelých těles byly kvantifikovány pomocí destruktivních zkoušek ve třibodovém ohybu v kombinaci s bezkontaktním optickým systémem digitální obrazové korelace. Pro interpretaci nelineárních a asymetrických kalorimetrických signálů byl v práci použit a parametrizován vlastní numerický model založený na součtu dvou Weibullových distribučních funkcí se společným počátkem času. Výsledky materiálových analýz prokázaly mimořádnou efektivitu varianty kombinující impregnaci dýh $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ a modifikaci fenol-formaldehydové lepené spáry dicyandiamidem. Výzkum odhalil významnou součinnost u systémů s černým louhem, kde volné fenolické skupiny biogenního ligninu kopolymerizovaly s fenol-formaldehydovou pryskyřicí během vysokoteplotního lisování, což v teplotním rozmezí 150–200 °C vyvolalo proces dodatečného síťování. Tento děj vedl k formování vysoce stabilní karbonizované bariéry, potlačení dýmotvornosti pod kritickou hranicí a k lokálnímu nárůstu zbytkové ohybové tuhosti,

která překonala i nativní nezasažený standard. Naopak diametrálně odlišný a silně negativní mechanismus byl identifikovatelný u variant modifikovaných jednosložkovým polyuretanovým adhezivem. V důsledku iontových interakcí retardérů na fázovém rozhraní došlo k parciální deaktivaci isokyanátových skupin, což způsobilo rapidní termolýzu polyuretanové matrice již při teplotách 140–160 °C. Tento kolaps vedl k okamžité delaminaci dýhových vrstev, nárůstu celkové výhřevnosti o 35 % a kritickému úbytku nosné funkce průřezu o 90 %. Práce přináší zásadní socio-ekologický přínos v podobě fixování ekologicky šetrných bio-derivovaných struktur přímo uvnitř kompozitu, čímž eliminuje těkavost a migraci látek do okolí, garantuje environmentální permanentnost a transformuje hořlavou biomasu na bezpečný sendvičový systém s vysokou schopností fixace uhlíku v pevné formě.

Klíčová slova: fenol-formaldehyd; zpomalovač hoření; mechanika; model hoření; překližovaný materiál.

Wood protection system for agglomerated materials by modification with flame retardant

Abstract

This doctoral dissertation addresses the comprehensive development and optimization of an advanced material system for the fire protection of large-scale wood-based agglomerated materials. The underlying problem stems from the unfavourable fire reaction classification of standard wood-based agglomerated and plywood materials, which are typically categorized as reaction-to-fire classes E and F. This limitation significantly hinders their integration into the load-bearing and multi-story structures of modern timber buildings. The primary objective of this research was to maximize the flame-retardant efficiency of the system in both the gaseous and condensed phases, while simultaneously preserving the mechanical, technological, and structural integrity of the wood matrix, specifically Norway spruce (*Picea abies*). The experimental framework of the study involved the design, manufacture, and multi-criteria testing specific material configurations of nine-layer structural plywood with a target thickness. Fire-retardant modification was achieved either through deep pressure impregnation of individual veneer sheets or by targeted addition of flame retardants into the adhesive systems. The research evaluated the efficacy of synthetic precursors – namely ammonium dihydrogen phosphate ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), potassium acetate (CH_3COOK), dicyandiamide ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$), and anhydrous sodium sulphate (Na_2SO_4) as well as a sustainable, bio-derived flame retardant consisting of industrial kraft black liquor with a high content of structural lignin. Fire behaviour and reaction kinetics were thoroughly diagnosed using cone calorimetry (according to ISO 5660-1) under a radiant heat flux, single-chamber smoke density testing (according to ČSN EN ISO 5659-2), and lateral flame spread testing on vertical specimens (according to ISO 5658-2). The vertical flame spread configuration was instrumented with internal Type K thermocouples to continuously record in-depth temperature profiles and analyse the thermal arrest associated with moisture evaporation near the 100 °C threshold. The mechanical reliability and stiffness of the charred specimens were quantified via destructive three-point bending tests coupled with a non-contact optical digital image correlation system. To interpret the non-linear and asymmetric calorimetric signals, an original predictive numerical model based on the superposition of two Weibull distribution functions with a common time origin was successfully implemented and parameterized. Material analysis results demonstrated the outstanding effectiveness of variant, which combines $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ veneer impregnation with dicyandiamide

modification of the phenol-formaldehyde glue line. Furthermore, the research revealed a significant structural synergy in systems utilizing black liquor, where the free phenolic groups of the biogenic lignin co-polymerized with the phenol formaldehyde resin during high temperature pressing. This triggered a post-curing process within the 150 °C to 200 °C temperature range, leading to the formation of a highly stable carbonized barrier, suppressing smoke production below the critical threshold, and resulting in a local increase in residual bending stiffness that outperformed the native, unexposed control. Conversely, a diametrically opposed and highly adverse mechanism was identified in configurations modified with a one-component polyurethane adhesive. Due to ionic interactions of the flame retardants at the phase interface, partial deactivation of the isocyanate groups occurred, causing rapid thermolysis of the PUR matrix at temperatures as low as 140–160 °C. This collapse led to immediate delamination of the veneer layers, a 35% increase in total heat release, and a critical 90% loss of the cross-section's load-bearing capacity. Ultimately, this work offers a substantial socio-ecological contribution by encapsulating of environmentally friendly, bio-derived structures directly within the wood-based agglomerated material. This eliminates the volatility and migration of substances into the surroundings, guarantees environmental durability, and transforms flammable biomass into a secure sandwich system capable of high-capacity solid-phase carbon fixation.

Keywords: fenol-formaldehyd; flame retardant; mechanics; combustion model; plywood material

Obsah

1	Úvod.....	19
2	Hypotézy a cíle práce	21
3	Literární rešerše	22
3.1	Velkoplošné materiály na bázi dřeva.....	22
3.1.1	Základní členění materiálů na bázi dřeva.....	22
3.1.2	Překližované aglomerované materiály na bázi dřeva.....	23
3.1.3	Další typy aglomerovaných materiálů na bázi dřeva	26
3.1.4	Materiály spojené minerálními pojivy	27
3.2	Technologie lisování aglomerátů.....	28
3.2.1	Princip lisování materiálů na bázi dřeva	28
3.2.2	Typy lisů používaných při výrobě materiálů na bázi dřeva.....	29
3.2.3	Současné trendy ve výzkumu lisovacích procesů	29
3.3	Adhezivní technologie.....	30
3.3.1	Faktory ovlivňující kvalitu adhezivního spoje	31
3.3.2	Močovino-formaldehydová adheziva (UF)	31
3.3.3	Fenol-formaldehydová adheziva (PF)	32
3.3.4	Melamin-formaldehydová adheziva (MF)	33
3.3.5	Izokyanátová adheziva (MDI).....	33
3.3.6	Polyuretanová adheziva (PUR)	34
3.4	Topografie povrchu jako determinant pevnosti spoje	35
3.4.1	Povrchová energie a smáčivost	35
3.4.2	Současné trendy ve výzkumu povrchové energie	36
3.4.3	Drsnost povrchu	37
3.5	Retardéry hoření a mechanismy požární ochrany dřeva	37
3.5.1	Retardéry na bázi bóru	38
3.5.2	Retardéry na bázi fosforu a dusíku.....	39

3.5.3	Shrnutí dosavadních poznatků o retardérech hoření	41
3.6	Hoření dřeva a termická degradace lignocelulózové matrice	42
3.6.1	Mechanismus pyrolýzy	42
3.6.2	Současné trendy a problematika požární bezpečnosti dřevěných konstrukcí ..	44
3.6.3	Modelování termické degradace a požárního chování dřeva	45
4	Metodika.....	48
4.1	Materiál	48
4.1.1	Analýza vstupní dřevní suroviny.....	48
4.1.2	Použité systémy pro zpomalování hoření.....	49
4.1.3	Termodegradační mechanismy použitých zpomalovačů hoření	52
4.1.4	Specifikace a charakteristika adhezivních systémů.....	64
4.2	Příprava zkušebních vzorků	69
4.2.1	Typy variant zkušebních vzorků.....	70
4.2.2	Metodický přístup k výrobě zkušebních těles	71
4.2.3	Tlaková impregnace dýh	73
4.2.4	Lepení, lisování a klimatizace zkušebních sestav	74
4.3	Hodnocení vlastností vyvíjených materiálů	75
4.3.1	Zkouška vývoje dýmu dle ČSN EN ISO 5659-2	76
4.3.2	Stanovení laterálního šíření plamene po svislých prvcích dle ISO 5658-2.....	78
4.3.3	Kónická kalorimetrie dle ISO 5660-1	82
4.3.4	Testování mechanických vlastností	84
4.4	Vyhodnocení experimentálních dat a parametrizace prediktivního modelu	89
4.4.1	Weibullovo rozdělení jako aproximační báze	90
4.4.2	Model součtu dvou Weibullových funkcí.....	90
4.4.3	Interpretace parametrů modelu.....	91
4.4.4	Odhad parametrů a stabilita modelu.....	92
4.4.5	Aplikace na hoření vrstevnatého materiálu s retardérem	92

4.4.6	Dílčí syntéza poznatků	93
5	Výsledky.....	94
5.1	Analýza vývoje kouře a optické hustoty	94
5.1.1	Varianty s nízkou emisí kouře, $D_{S,max} = 0-100$	95
5.1.2	Varianty se střední emisí kouře, $D_{S,max} = 100-250$	95
5.1.3	Varianta s vysokou emisí kouře, $D_{S,max} > 400$	96
5.1.4	Rychlost změny specifické optické hustoty dD_S/dt	97
5.1.5	Zrychlení specifické optické hustoty $d^2 DS / dt^2$	98
5.2	Vyhodnocení laterálního šíření plamene po svislé ploše (ISO 5658-2).....	99
5.2.1	Vyhodnocení instrumentace a měření teplotních profilů.....	101
5.2.2	Vliv vlhkosti a izotermická prodleva	101
5.2.3	Chování varianty 8A s PUR lepidlem	102
5.2.4	Teplotní profily v hloubce 5 mm pod exponovaným povrchem	102
5.2.5	Komparativní zhodnocení materiálových variant	105
5.2.6	Syntéza výsledků termické analýzy	106
5.3	Vyhodnocení reziduální mechanických vlastností	110
5.3.1	Reziduální tuhost v ose y	110
5.3.2	Fenomén lokálního zpevnění v teplotně ovlivněné zóně	112
5.3.3	Zdánlivý modul pružnosti v ohybu	112
5.3.4	Relativní změna zbytkové únosnosti v ohybu.....	113
5.3.5	Vizuální hodnocení zuhelnatění a vztah k mechanické odezvě	114
5.4	Vyhodnocení zkoušky na kónickém kalorimetru	116
5.4.1	Časový průběh <i>ARHE</i> a fáze termické degradace	117
5.4.2	Relativní útlum tepelné emise RRF	118
5.4.3	První derivace <i>ARHE</i> a identifikace fázových přechodů	121
5.4.4	Celkově uvolněné teplo <i>THR</i>	123
5.4.5	Fázový portrét hoření <i>ARHE-THR</i>	124

5.4.6	Vyhodnocení <i>ARHE</i> pomocí modelu a jeho verifikace	126
6	Diskuse výsledků a mezioborová syntéza	135
6.1	Materiálově-technologická integrace retardace.....	135
6.2	Mechanická integrita a kohezní pevnost kompozitu za studena	138
6.3	Hodnocení synergických mechanismů použitých aditiv a jejich environmentální permanentnost	140
6.4	Validace aproximační schopnosti modelu a verifikace experimentálních dat.....	144
6.4.1	Datově orientované modelování spalovacích procesů	145
6.4.2	Modelování šíření požáru a vazba na laboratorní měřítko	145
6.4.3	Modelování <i>HRR</i> a význam nelineárních fluktuací	146
6.4.4	Přístupy založené na neuronových sítích a limity čistě datových modelů	147
6.4.5	Překonání rozdílu mezi simulací a realitou	147
6.4.6	Modelování transportních dějů v heterogenních a porézních strukturách	147
7	Závěr.....	149
7.1	Přínos pro praxi	153
7.2	Přínos pro vědu.....	155
	Seznam literatury.....	156
	Internetové zdroje.....	174
	Seznam norem	175
	Seznam obrázků	177
	Seznam tabulek	179
	Seznam grafů.....	180
	Přehled publikační činnosti	181

Seznam použitých zkratek, fyzikálních znaků a matematických symbolů

Seznam zkratek

AI	Umělá inteligence (<i>Artificial Intelligence</i>)
ANN	Umělé neuronové sítě (<i>Artificial Neural Networks</i>)
API	Vodné polymer-izokyanátové adhezivum (<i>Aqueous Polymer Isocyanate</i>)
APP	Polyfosforečnan (polyfosfát) amonný (<i>Ammonium Polyphosphate</i>)
ARHE	Průměrná rychlost uvolňování tepla (<i>Average Rate of Heat Emission</i>)
BK	Buk lesní (<i>Fagus sylvatica L.</i>)
BO	Borovice lesní (<i>Pinus sylvestris L.</i>)
BR	Bříza bělokorá (<i>Betula pendula</i>)
CBPC	Chemicky vázaná fosfátová keramika (<i>Chemically Bonded Phosphate Ceramics</i>)
CFD	Výpočetní dynamika tekutin (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CLT	Křížem lepené dřevo (<i>Cross Laminated Timber</i>)
DCD	Dicyandiamid ($C_2H_4N_4$)
DAP	Hydrogenfosforečnan diamonný ($(NH_4)_2HPO_4$)
DIC	Digitální obrazová korelace (<i>Digital Image Correlation</i>)
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie (<i>Differential Scanning Calorimetry</i>)
EHC	Efektivní spalné teplo (<i>Effective Heat of Combustion</i>)
FFT	Rychlá Fourierova transformace (<i>Fast Fourier Transform</i>)
GP	Guanidinfosfát – fosforečný retardér hoření
HPL	Vysokotlaký laminát (<i>High-Pressure Laminate</i>)
HRR	Rychlost uvolňování tepla (<i>Heat Release Rate</i>)
ILs	Iontové kapaliny (<i>Ionic Liquids</i>)
LCA	Hodnocení životního cyklu (<i>Life Cycle Assessment</i>)

LMUF	Melamin-močovino-formaldehydová pryskyřice modifikovaná hydroxy-methylovaným ligninem
LOI	Limitní kyslíkový index (<i>Limiting Oxygen Index</i>)
MAP	Dihydrogenfosforečnan amonný ($(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$)
MARHE	Maximální průměrná rychlost uvolňování tepla (<i>Maximum Average Rate of Heat Emission</i>)
MDF	Polotvrdá dřevovláknitá deska (<i>Medium-Density Fiberboard</i>)
MDI	Methylen-difenyl-diizokyanát
MF	Melamin-formaldehydová adheziva
MKPC	Hořečnato-draselný fosfátový cement (<i>Magnesium Potassium Phosphate Cement</i>)
MLR	Rychlost úbytku hmotnosti (<i>Mass Loss Rate</i>)
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
MOE	Modul pružnosti v ohybu (<i>Modulus of Elasticity</i>)
MOR	Modul lomu / Pevnost v ohybu (<i>Modulus of Rupture</i>)
NFPC	Biokompozity vyztužené přírodními vlákny (<i>Natural Fibre Plastic Composites</i>)
OL	Olše lepkavá (<i>Alnus glutinosa</i>)
OSB	Deska z orientovaných plochých třísek (<i>Oriented Strand Board</i>)
PF	Fenol-formaldehydová adheziva
PUR	Polyuretanová adheziva
PURHA	Polyuretanová reaktivní tavná lepidla (<i>Polyurethane Reactive Hot Melt Adhesives</i>)
PVAc	Polyvinylacetát
RRF	Faktor relativního útlumu tepelné emise (<i>Relative Reduction Factor</i>)
SM	Smrk ztepilý (<i>Picea abies L.</i>)
TGA	Termogravimetrická analýza (<i>Thermogravimetric Analysis</i>)
THR	Celkové uvolněné teplo / Požární zatížení (<i>Total Heat Released</i>)

TP	Topol osika (<i>Populus tremula</i>)
TSP	Celková produkce kouře (<i>Total Smoke Production</i>)
UF	Močovino-formaldehydová adheziva
VOC	Těkavé organické sloučeniny (<i>Volatile Organic Compounds</i>)
WPC	Dřevoplastové kompozity (<i>Wood-Plastic Composites</i>)

Seznam fyzikálních znaků a matematických symbolů

ρ	Hustota materiálu (objemová hmotnost), udávaná v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
E	Modul pružnosti v ohybu (MOE), kvantifikuje elastickou deformaci prvků v MPa/GPa.
R_a	Aritmetická průměrná drsnost – průměr absolutních odchylek profilu povrchu od střední čáry v μm .
R_z	Průměrná maximální výška profilu drsnosti – průměrný rozdíl mezi nejvyššími vrcholy a nejnižšími prohlubněmi v μm .
R_q	Kvadratická průměrná drsnost povrchu (Root Mean Square Roughness) v μm .
R_t	Celková drsnost – rozdíl mezi nejvyšším vrcholem a nejnižším údolím v rámci vzorkovací délky μm .
R_p	Maximální výška vrcholu profilu nad střední čarou drsnosti v μm .
R_v	Maximální hloubka údolí profilu pod střední čarou drsnosti v μm .
R_{sk}	Asymetrie profilu drsnosti (Skewness) – popisuje symetrii rozdělení výšek nerovností.
R_{ku}	Špičatost profilu drsnosti (Kurtosis) – charakterizuje ostrost vrcholů profilu.
λ_a, λ_q	Charakteristiky vlnových délek – popisují prostorovou frekvenci nerovností povrchu.
A_a, A_q	Parametry amplitudy – popisují velikost výškových odchylek geometrie.
S, S_m	Prostorové parametry drsnosti – charakterizují vzdálenosti a krok mezi jednotlivými prvky textury.
λ	Součinitel tepelné vodivosti materiálu v $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; současně v textu vystupuje jako škálový parametr Weibullový distribuční funkce určující časovou osu hoření (λ_i).

c_p	Měrná tepelná kapacita lignocelulózové hmoty vyjádřená v $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
E_a	Aktivační energie termochemického rozkladu pyrolýzy vyjádřená v $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.
A	Pre-exponenciální faktor v Arrheniově rovnici; v kapitole modelování značí amplitudu a celkový energetický příspěvek dané fáze hoření (A_i).
k	Tvarový parametr Weibullova rozdělení řídící dynamiku náběhu a dozívání spalování (k_i); současně značí lokální mechanickou tuhost ohořelého kompozitu v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$.
D	Optická hustota kouře definovaná jako logaritmický poměr zeslabení světelného toku.
D_s	Specifická optická hustota kouře vztažená na objem komory, plochu vzorku a délku optické dráhy.
$D_{s,\max}$	Maximální specifická optická hustota kouře zaznamenaná během celé zkoušky.
V	Objem uzavřené zkušební jednokomorové stanice pro testování dýmotvornosti v m^3 .
A	Exponovaná plocha zkušebního tělesa vystavená konstantnímu incidentnímu toku (m^2).
L	Délka optické dráhy světelného paprsku fotometrické soustavy v m.
I_t	Intenzita světelného toku registrovaná fotodetektozem v čase t .
I_0	Počáteční referenční intenzita světelného toku v čistém prostředí před rozvojem dýmu.
q''	Okamžitá rychlost uvolňování tepla na jednotku plochy (HRR) udávaná v $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$.
t	Celkový čas od počátku expozice nebo zatěžování, vyjádřený v s nebo min.
t_{ig}	Čas do iniciace stabilního plamenného hoření (<i>Time to Ignition</i>) v sekundách.
$t_{p,i}$	Časový okamžik odpovídající lokálnímu maximu parciální Weibullovky funkce rozkladu.
$F_{\max}$	Reziduální ohybová síla (maximální zatížení při destrukci tělesa) v N.
b, h	Efektivní rozměry (šířka a výška) reziduálního nosného průřezu po uhelnatění a pyrolýze (mm).
L	Rozpětí podpor zkušebního stroje při třibodovém ohybovém namáhání (mm).

1 Úvod

Dřevo je jedním z nejstarších a nejpoužívanějších materiálů v lidské historii. Jeho využití se datuje až do pravěku, kdy sloužilo jako jeden z hlavních stavebních materiálů k vytváření obydlí, nábytku a dalších potřebných předmětů. Dnes je dřevo stále oblíbeným materiálem ve stavebnictví, a to z mnoha důvodů. Prvním a nejdůležitějším faktorem je jeho přírodní původ a obnovitelnost. Dřevo je produktem zelených rostlin, které po dobu svého růstu absorbují oxid uhličitý z atmosféry a ukládají ho ve formě uhlíku. Při zpracování dřeva na stavební materiál se tedy tento uhlík po určitou dobu neuvolňuje do ovzduší, což z něj činí ekologicky šetrnou volbu. Navíc může být dřevní materiál získán z řádně spravovaných lesů, které jsou schopny obnovit své stavy a poskytovat trvalou zásobu tohoto materiálu.

Dalším faktorem je energetická účinnost dřeva. Dřevní materiál má přirozené izolační schopnosti, které přispívají ke snížení tepelných ztrát ve stavebních konstrukcích. To znamená, že stavby ze dřeva mohou být energeticky účinnější a mohou výrazně snížit náklady na vytápění a chlazení. Navíc dřevěné konstrukce mají také příznivé zvukově-izolační vlastnosti.

Bezpečnost a odolnost proti požáru jsou klíčovými faktory při výběru stavebního materiálu. V posledních letech se čím dál více hovoří o odolnosti materiálů na bázi dřeva vůči požáru. Mnoho lidí si klade otázku, jak dřevěný materiál zvládne požár a zda je skutečně bezpečnou volbou. Důležitým aspektem je, že dřevní materiály mají určitou přirozenou odolnost proti požáru. Dřevo se totiž chová jinak než jiné stavební materiály, jako jsou kovy nebo beton, je-li vystaveno vysokým teplotám. Především u menších požárů dochází na povrchu dřeva ke vzniku uhlíkové vrstvy, což vytváří ochrannou bariéru a zabraňuje přímému kontaktu plamenů s dřevem. To umožňuje dřevu udržet svou nosnost a strukturální celistvost i při ohni.

Moderní technologie a výzkum umožňují zlepšení odolnosti dřevních materiálů proti požáru. Existuje mnoho ochranných nátěrů a povrchových úprav, které jsou schopny zpomalit šíření ohně a přispět k zachování stability konstrukce. Požáry mohou způsobit ničující škody na majetku, ohrozit životy lidí a mít negativní dopad na životní prostředí. Je proto nezbytné vyvíjet moderní a nové metody ochrany stavebních konstrukcí proti požáru.

Moderní ochrana konstrukcí proti požáru se dnes soustředí na vyvážený podíl dvou přístupů k ochraně, a to jak pasivní, jako jsou odolné materiály nebo izolační systémy, tak i aktivní ochrany. Dynamicky se rozvíjející technologie přinášejí nové aktivní metody ochrany,

kteřé jsou schopné detekovat, monitorovat a potlačovat požáry. Jednou z klíčových technologií je použití automatických požárních systémů, jež rychle detekují požár a aktivují opatření k jeho likvidaci. Tyto systémy využívají moderní senzory a detektory, které dokážou identifikovat nebezpečné situace a spustit alarm. Kromě toho je také u některých systémů možné využít automatické hasicí technologie, jako jsou spreje, které okamžitě potlačují požáry a snižují škody na konstrukci. Dalším přístupem je použití moderních materiálů se zvýšenou odolností proti požáru. Nové postupy v chemickém a stavebním průmyslu umožňují vytváření materiálů, které mají vynikající protipožární vlastnosti a jsou stále na přírodní bázi.

Disertační práce je zaměřena na vývoj systému ochrany dřeva přírodními a syntetickými retardéry proti působení účinků hoření určeného primárně pro výrobu aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Aktuálně jsou tyto materiály řazeny do třídy reakce na oheň E a F. Principem ochrany je vývoj účinného systému retardéru hoření ve formě chemického modifikačního roztoku schopného reagovat s lepicím systémem pro výrobu aglomerovaných překližovaných materiálů pro nekonstrukční a konstrukční použití s bariérovým efektem pro zpomalení šíření požáru.

V rámci této práce bude hodnocena účinnost vybraných typů přírodních retardérů na bázi křemíku, hydroxidu hlinitého, hydroxidu hořečnatého a syntetických retardérů na bázi boritanů, a to pentahydrát tetraboritanu sodného, dekahydrát tetraboritanu sodného, kyseliny borité, oxidu boritého, pentaboritanu amonného, a ověření jejich účinnosti. Účinnost systému retardéru a adheziva bude stanovena prostřednictvím testů reakce materiálu s aplikovaným retardérem na oheň. Adhezivní reaktivnost retardéru s adhezivem pro uplatnění do daného nekonstrukčního anebo konstrukčního aglomerovaného materiálu na bázi dřeva bude stanovena na základě realizovaných testů pro ověření mechanických charakteristik, kladených na vyvíjený materiál a s ohledem na požadavky pro dané použití.

2 Hypotézy a cíle práce

Vědecké hypotézy práce

H1: Synergie biogenních a syntetických prekurzorů. Aplikace retardačního systému založeného na synergii přírodního ligninu, obsaženého v alkalickém černém louhu, a dusíkatých aditiv do vnitřní struktury aglomerovaného materiálu na bázi dřeva umožní formování vysoce stabilní karbonizované bariéry s vysokou schopností fixace uhlíku, což povede k významné redukci tepelné emise (ARHE) a celkového požárního zatížení (THR).

H2: Termomechanická kompatibilita a post-curing. Přítomnost specificky navržených retardérů v lepené spáře neinhibuje polykondenzační procesy fenol-formaldehydových adheziv, nýbrž vlivem teplotního gradientu katalyzuje proces dodatečného síťování (post-curing). To umožní zachování strukturální celistvosti a zvýšení reziduální ohybové tuhosti aglomerovaného materiálu na bázi dřeva i po termické expozici.

H3: Technologická integrabilita. Začlenění navržených modifikačních systémů do standardních výrobních cyklů aglomerovaných a překližovaných materiálů je realizovatelná bez nutnosti zásadní úpravy technologických linek, při zachování normativních požadavků na adhezi a soudržnost materiálu.

Hlavní cíl práce

Cílem práce je vyvinout vhodný systém modifikace překližovaného dřeva pro nekonstrukční a konstrukční aplikace retardérem hoření pro zvýšení bariérového efektu požární odolnosti a zároveň zachovat vhodné vlastnosti pro použití standardních lepicích procesů.

Dílčí cíle práce

- Stanovení vlivu retardéru na povrch materiálu z hlediska jeho adheze vzhledem ke standardním druhům adheziva.
- Stanovení hloubky penetrace různých retardérů hoření a jejich vliv na strukturu dřeva.
- Vliv vybraných retardérů hoření v překližovaných materiálech na rychlost šíření požáru.
- Vliv vybraných retardérů hoření v aglomerovaném materiálu na bázi dřeva na mechanické vlastnosti výsledného produktu.

3 Literární rešerše

Předkládaná literární rešerše mapuje současný stav vědeckého poznání a technologické praxe v oblasti zvyšování protipožární bezpečnosti materiálů na bázi dřeva. S ohledem na značnou složitost problematiky a vnitřní provázanost teoretického výzkumu s průmyslovým využitím je text strukturován do tematických oddílů, které kriticky hodnotí klíčové aspekty využitelnosti finálních produktů.

Hlavním cílem této rešerše je definovat základní materiálové parametry nezbytné pro vývoj nových materiálů na bázi dřeva, a to v přímé závislosti na jejich možnostech využití a při současném zachování environmentální udržitelnosti. Práce směřuje k identifikaci optimálního poměru mezi účinností systémů protipožární retardace a zachováním užitných vlastností aglomerovaných a překližovaných materiálů.

Mezi určující faktory pro zavedení těchto systémů do současné praxe patří zejména ekonomická náročnost výroby a vstupních surovin, celková uhlíková stopa produktu a v neposlední řadě problematika recyklovatelnosti a materiálového využití po ukončení životního cyklu (end-of-life).

Literární rešerše tak tvoří teoretický rámec pro stanovení optimálních směrů výzkumu v oblasti protipožární ochrany materiálů na bázi dřeva.

3.1 Velkoplošné materiály na bázi dřeva

Velkoplošné materiály na bázi dřeva představují významnou skupinu konstrukčních a nekonstrukčních materiálů vyráběných z masivního dřeva, dýh, vláken nebo třísek za využití mechanických, adhezivních a teplotně-tlakových procesů (Wang et al., 2025). Tyto systémy vykazují příznivý poměr mezi výrobními náklady a mechanickou pevností, nízkou objemovou hmotností a nastavitelnou odolností vůči vnějším vlivům. Vzhledem k vysoké technicko-ekonomické účinnosti nacházejí široké uplatnění ve stavebnictví a průmyslu, kde se využívá široké spektrum specificky modifikovaných lignocelulózových produktů (Yang et al., 2023).

3.1.1 Základní členění materiálů na bázi dřeva

Materiály na bázi dřeva lze obecně rozdělit na masivní, překližované a aglomerované. Masivní materiály si zachovávají původní strukturu dřeva, zatímco překližované a aglomerované

materiály vznikají spojováním dýh, třísek nebo vláken pomocí lepidel a lisování. Vzhledem k zaměření této práce je další text soustředěn především na překližované aglomerované materiály na bázi dřeva.

3.1.2 Překližované aglomerované materiály na bázi dřeva

Překližované materiály jsou materiály, které jsou vytvořeny spojením různých vrstev, obvykle slepených pod úhlem 90°, tedy křížem. Patří sem například lamely, překližky nebo laťovky. Tyto materiály mají výhodu v kombinaci vlastností jednotlivých vrstev, a to jak z hlediska pevnosti, tak stability. Díky křížovému uspořádání vrstev jsou překližované materiály odolnější proti deformacím a zvlnění materiálu. Jsou často používány ve stavebnictví, nábytkářství a dalších oborech, kde je vyžadována stabilita a pevnost materiálu (Güntekin et al., 2025).

V rámci této práce jsou překližované materiály chápány jako specifická skupina aglomerovaných materiálů na bázi dřeva, u nichž je rozhodující vrstvená struktura dýh, typ lepidla a způsob modifikace zpomalovači hoření.

3.1.2.1 Konstrukce a výroba překližek

Překližka vzniká lepením dýhových listů, přičemž sousední vrstvy jsou obvykle orientovány kolmo na sebe. Toto uspořádání snižuje přirozenou směrovou rozdílnost vlastností dřeva a zvyšuje rozměrovou stabilitu materiálu. Výsledné vlastnosti překližky jsou ovlivněny zejména druhem dřeviny, počtem a tloušťkou dýh, typem použitého adheziva a povrchovou úpravou. Vzhledem ke své stabilitě a pevnosti se překližka využívá ve stavebnictví i nábytkářství (Jang et al., 2024).

Pro výrobu překližek se používají různé domácí i zahraniční dřeviny. V podmínkách České republiky se často uplatňuje zejména smrk, borovice, buk, bříza, topol a olše. Volba dřeviny závisí na požadované pevnosti, hmotnosti, vzhledu a odolnosti finálního materiálu (Ashori et al., 2023).

3.1.2.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti překližek

Překližka je materiál složený z několika vrstev dýh, které jsou vzájemně spojeny adhezivem. Její fyzikální a mechanické vlastnosti jsou důležité pro posouzení vhodnosti použití v různých aplikacích (Park et al., 2026).

Fyzikální charakteristiky překližovaných materiálů jsou primárně definovány objemovou hmotností, vlhkostním stavem, tepelnou vodivostí a akustickými parametry. Objemová hmotnost se standardně pohybuje v rozmezí 400 až 800 kg·m⁻³, přičemž výsledná hodnota je přímo úměrná hustotě použité dřevní suroviny a tloušťce jednotlivých dýhových vrstev. Klíčovým faktorem je aktuální vlhkost materiálu, která zásadně ovlivňuje jeho pevnostní charakteristiky a rozměrovou stabilitu. Koeficient tepelné vodivosti a schopnost akustické absorpce či reflexe jsou pak funkcí anatomické struktury dřeva a celkové tloušťky materiálu (Belhadj et al., 2024, Kojima et al., 2025).

V rámci mechanických vlastností jsou sledovány zejména pevnostní limity, tuhost, povrchová tvrdost a odolnost vůči otěru (Hrázský & Král, 2005):

- Pevnost: stanovuje se pomocí zkoušek v tahu, ohybu a tlaku.
- Tuhost: vyjadřuje se modulem pružnosti (E), který definuje schopnost materiálu odolávat elastické deformaci při vnějším zatížení.
- Povrchová odolnost: zahrnuje tvrdost a odolnost proti otěru, což jsou parametry ovlivňující životnost materiálu v exponovaných aplikacích.

3.1.2.3 Současné trendy ve výzkumu a modifikaci překližek

V současné době se výzkum překližovaných materiálů zaměřuje především na zlepšování jejich mechanických vlastností, snižování emisí formaldehydu a zvyšování požární odolnosti. Například Yadav et al. (2022) studovali modifikaci třívrstvé překližky a její lepené spáry nanojílem v močovino-formaldehydových pryskyřicích v alkalické fázi syntézy. Výsledky prokázaly snížení emisí formaldehydu a současně zlepšení smykové a tahové pevnosti přibližně o 25 %.

Problematické tepelné modifikace překližovaných materiálů se věnovali Zanuttini et al. (2021), kteří sledovali změny tvrdosti a kontaktního úhlu smáčení povrchu překližky. Tyto parametry mohou přispět k lepšímu pochopení chování materiálu během termické degradace v raných stádiích požáru.

Modifikace vstupních surovin zpravidla přináší současně pozitivní i negativní změny vlastností, přičemž výsledný efekt závisí na požadovaném způsobu použití produktu. Wu & Xu (2022) uvádějí, že impregnace topolových dřív furfurylalkoholem zvýšila akustickou účinnost překližky o 10,8–19,1 % ve srovnání s nemodifikovaným materiálem.

Významnou metodou modifikace dřeva je rovněž acetylace, která zlepšuje rozměrovou stabilitu materiálu a jeho odolnost vůči vlhkosti. Slabohm et al. (2022) prokázali, že lepicí vlastnosti acetylovaných dřív se významně liší v závislosti na použitém lepidle, typu dřeva a způsobu acetylace. Současně upozorňují na potřebu dalšího výzkumu, zaměřeného zejména na:

- vliv vysokých teplot během lisování na stabilitu navázaných acetylových skupin,
- změny přilnavosti adheziva v různých částech struktury materiálu.

Významný směr výzkumu představuje také zvyšování požární odolnosti překližovaných materiálů. Jednou z možností je tvorba kompozitních struktur kombinujících překližku s dalšími funkčními vrstvami. Liang et al. (2023) popsali systém využívající vysokotlaký laminát (HPL) impregnovaný termosetovou pryskyřicí o tloušťce přibližně 1 mm. Takto modifikovaný materiál vykazoval vyšší odolnost vůči ohni i opotřebení. Jako spojovací systém bylo použito jednosložkové polyuretanové lepidlo, které vykazovalo vyšší adhezi ve srovnání s běžně používanými amino-pryskyřicemi.

Další možností je impregnace dřív retardéry hoření. Yan et al. (2023) zkoumali vliv guanidinfosfátu (GP) na požární vlastnosti překližky. Výsledky ukázaly, že modifikace GP výrazně zvyšuje požární odolnost a současně snižuje produkci kouře. Při použití 10% roztoku GP dosáhl limitní kyslíkový index (LOI) hodnoty 37 %, což představovalo téměř dvojnásobek oproti nemodifikované překližce. Současně došlo k významnému snížení rychlosti uvolňování tepla (HRR) a celkové produkce kouře (TSP).

Perspektivní přístup představují také ochranné povlaky aplikované na povrch překližek. Jedním z nich je hořečnato-draselný fosfátový cement (MKPC), který patří mezi chemicky vázané fosfátové keramiky (CBPC) a je založen na tvorbě struvitu -K ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Wagh, 2016; Graeser et al, 2008). Experimentální studie prokázaly vysokou tepelnou stabilitu těchto systémů. Sugama a Kukacka (1983) zaznamenali zvýšení pevnosti v tlaku po vystavení teplotám až 1300 °C. Podobně Gao et al. (2016) prokázali, že MKPC i hořečnato-amonný fosfátový cement s přídavkem wollastonitu vykazují vysokou tepelnou odolnost až do 1000 °C.

Po zahřátí navíc docházelo ke zhutnění struktury materiálu, což následně potvrdili také Fang et al. (2021).

3.1.3 Další typy aglomerovaných materiálů na bázi dřeva

Aglomerované materiály představují materiály vyráběné spojováním dřevních částic, vláken, štěpek nebo dýh pomocí lepidel, tlaku a zvýšené teploty. Tyto systémy vykazují příznivý poměr mezi výrobními náklady a mechanickou pevností, nízkou objemovou hmotností a nastavitelnou odolností vůči vnějším vlivům. Vzhledem k vysoké technicko-ekonomické účinnosti nacházejí široké uplatnění ve stavebnictví a průmyslu (Amal et al., 2016).

Aglomerované materiály na bázi dřeva jsou vyráběny spojením drobných částic dřeva, jako jsou vlákna, třísky nebo štěrky, pomocí lepicího systému a působení tlaku, případně zvýšené teploty. Výsledné vlastnosti materiálu jsou ovlivněny druhem použité suroviny, velikostí částic, typem pojiva a technologickými parametry výroby. Oproti masivním a překližovaným materiálům umožňují efektivnější využití dřevních surovin a výrobu velkoformátových desek s homogennější strukturou.

Vzhledem k zaměření této práce jsou následující skupiny uvedeny pouze stručně jako obecný přehled aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Další části práce se soustředí především na překližované aglomerované materiály a jejich protipožární úpravu.

3.1.3.1 Dřevotřískové desky

Dřevotřískové desky jsou vyráběny lisováním dřevních třísek s lepidlem, nejčastěji na bázi močovino-formaldehydové pryskyřice. Jejich vlastnosti jsou ovlivněny velikostí třísek, hustotou desky, typem lepidla a lisovacími podmínkami. Současný výzkum se zaměřuje zejména na snížení hořlavosti, omezení emisí a využití ekologičtějších bezhalogenových zpomalovačů hoření (Berigüete Alcántara et al., 2025; Kurek et al., 2024).

3.1.3.2 OSB desky

OSB desky jsou tvořeny orientovanými třískami, které jsou lisovány s lepidlem do vícevrstvé struktury. Výzkum těchto materiálů se zaměřuje především na požární bezpečnost, odolnost vůči vlhkostnímu a teplotnímu namáhání a možnost náhrady jehličnatých dřevin rychle rostoucími listnatými druhy, například topolem, vrbou nebo břízou (Kuklík et al., 2015;

Lille et al., 2022; Lunguleasa et al., 2020). Z hlediska této práce jsou OSB desky důležité především jako příklad aglomerovaného materiálu, u něhož požární odezvu ovlivňuje struktura částic, typ lepidla a ochranná úprava povrchu.

3.1.3.3 Dřevovláknité desky

Dřevovláknité desky, zejména MDF, jsou vyráběny z dřevních vláken spojených lepidlem za působení tlaku a teploty. Jejich vlastnosti jsou ovlivněny druhem vláken, typem lepidla, hustotou a způsobem lisování. Současný výzkum se zaměřuje na úpravu vstupní suroviny, využití recyklovaných vláken, zlepšení rozměrové stability a možnosti snižování environmentální zátěže výroby (Čamlíbel et al., 2024; Rodríguez et al., 2024; Tang et al., 2026). Pro tuto práci jsou dřevovláknité desky uvedeny pouze jako doplňková skupina aglomerovaných materiálů na bázi dřeva.

3.1.4 Materiály pojené minerálními pojivy

Materiály pojené minerálními pojivy představují specifickou skupinu materiálů na bázi dřeva, u nichž je soudržnost jednotlivých částic zajištěna anorganickými pojivy. Mezi nejvýznamnější zástupce patří materiály pojené cementem a sádrou. Takové materiály se vyznačují zejména zvýšenou odolností vůči vlhkosti, biologickým škůdcům a v některých případech také lepší požární odolností ve srovnání s běžnými materiály pojenými organickými adhezivy.

Cementovláknité a sádrovláknité desky se využívají především ve stavebnictví, kde je požadována vyšší odolnost vůči vlhkosti, mechanickému namáhání nebo požáru. Cementem pojené materiály obecně vykazují vyšší odolnost vůči vlhkosti a ohni, zatímco sádrovláknité desky jsou využívány zejména pro vnitřní stavební prvky a konstrukce s požadavkem na snadné zpracování (Taiwo et al., 2025; Trociński et al., 2024).

Recyklace těchto materiálů je možná zejména mechanickým drcením a následným využitím vzniklé frakce jako plniva nebo přísady do stavebních směsí. Vzhledem k minerálnímu pojivu je však jejich recyklace technologicky odlišná od recyklace aglomerovaných materiálů pojených organickými lepidly.

Z pohledu této disertační práce nepředstavují materiály pojené minerálními pojivy primární oblast zájmu. Pro aplikaci systémů retardérů hoření jsou perspektivnější především překližované aglomerované materiály na bázi dřeva, které se běžně využívají v nosných

konstrukcích a významně se podílejí na jejich celkové tuhosti a mechanické odolnosti (Sedira 2017).

3.2 Technologie lisování aglomerátů

Technologie výroby materiálů na bázi dřeva představují soubor procesů, jejichž cílem je přeměna lignocelulózových surovin na produkty s požadovanými fyzikálními, mechanickými a užitnými vlastnostmi. Výsledné vlastnosti materiálů jsou ovlivněny nejen druhem použité suroviny a adhezivního systému, ale také technologickými parametry jednotlivých výrobních operací. Mezi nejvýznamnější faktory patří zejména způsob formování rohože, lisovací tlak, teplota a doba lisování. Správná volba výrobních parametrů umožňuje optimalizovat mechanickou pevnost, rozměrovou stabilitu, odolnost vůči vlhkosti i další vlastnosti důležité pro konkrétní aplikace materiálů na bázi dřeva (Thoemen et al., 2010).

3.2.1 Princip lisování materiálů na bázi dřeva

Proces spojování působením teploty a tlaku lignocelulózových částic (vláken, třísek či jiných frakcí) představuje klíčový technologický úsek, jehož cílem je dosažení vysoké strukturní celistvosti, mechanické odolnosti a rozměrové stability finálního produktu. Tato technika umožňuje, oproti konvenčnímu obrábění masivního dřeva, dosáhnout vysoké homogenity materiálů a realizovat komplexní tvarovou profilaci prvků.

Efektivita procesu je určena třemi základními faktory: lisovacím tlakem, teplotou a dobou lisování. Vzájemné působení těchto parametrů je definováno v závislosti na druhu vstupní suroviny a požadovaných vlastnostech výsledného materiálu, jako jsou odolnost vůči vlhkosti, požární odolnost či specifická povrchová struktura. Kvalita výsledného aglomerovaného materiálu na bázi dřeva je kriticky závislá na vztahu mezi vstupní surovinou a chemickou povahou adhezivního systému. Tento systém musí být plně kompatibilní s nastavením procesních parametrů lisu, zahrnujících nejen samotnou fázi lisování, ale i následnou egalizaci, která slouží k homogenizaci vnitřního napětí a vlhkostního pole materiálu (Maturana et al., 2023; Lyutyy et al., 2024).

3.2.2 Typy lisů používaných při výrobě materiálů na bázi dřeva

Významným faktorem ovlivňujícím průběh lisovacího procesu a výsledné vlastnosti materiálu je konstrukce použitého lisovacího zařízení. V průmyslové výrobě materiálů na bázi dřeva se využívá několik typů lisů, které se liší principem působení tlaku, produktivitou i oblastí použití (Thoemen et al., 2010).

Při výrobě materiálů na bázi dřeva se používají zejména hydraulické, víceetážové, válcovací, vakuové, kalandrové a pneumatické lisy. Hydraulické a víceetážové lisy se uplatňují především při výrobě překližek a dalších velkoplošných materiálů, protože umožňují rovnoměrné působení tlaku a kvalitní spojení jednotlivých vrstev. Válcovací a kalandrové lisy jsou vhodné zejména pro kontinuální výrobu nebo povrchovou úpravu tenkých materiálů. Vakuové a pneumatické lisy se využívají spíše pro tvarově složitější prvky nebo méně náročné výrobní operace (Zhu et al., 2017; Zhou et al., 2023; Neyses et al., 2023).

Volba vhodného typu lisu závisí na charakteru vstupní suroviny, typu vyráběného materiálu, požadované produktivitě výroby a požadavcích na výsledné fyzikální a mechanické vlastnosti produktu.

3.2.3 Současné trendy ve výzkumu lisovacích procesů

Nejnovější studie hodnotí vliv velikosti a typu vstupní suroviny na chování desek na bázi dřeva při působení teploty a tlaku páry během lisování za tepla. Výsledky ukázaly, že rozložení hustoty v rovině by mohlo být indikátorem chování tlaku páry. Prášek a částice vykazovaly vysokou sypanou hustotu, zatímco vlákna a třísky vykazovaly velmi nízkou objemovou hustotu. Hodnota teploty plató se zvyšovala v pořadí částice, vlákna, prášek a třísky. Teplotní chování dýhy bylo odlišné od chování třísek tvarovaných do rohože. Maximální tlak páry odpovídal teplotě plató u panelů tvořených rohoží. Tlak páry dýhy byl nízký, i když teplota plató byla vysoká (Nguyen et al., 2022).

V další studii se autoři věnovali optimalizaci adheziva a jeho vlastnostem při zvýšeném tlaku a teplotě během lisování. V rámci optimalizovaných přípravků vykazovaly tři sledované materiály zlepšenou tvrdost o 35 % (dřevotříska), 42 % (MDF) a 51 % (překližka). Současně byla zaznamenána zvýšená odolnost proti oděru o 28 % (dřevotříska), 22 % (MDF) a 27 % (překližka) (Yu et al., 2020).

V rámci experimentů lisování za studena, byly zkoumány materiálové vlastnosti dřevěných podlah s emulzní polymer-izokyanátovou lepicí hmotou. Vliv doby lisování, tlaku a rychlosti nanášení lepidla na modul pružnosti (MOE) a modul lomu (MOR) byl analyzován na základě ortogonálního experimentálního návrhu. Podle výsledků byly MOE i MOR pozitivně korelovány s lisovacím tlakem a rychlostí nanášení lepidla. MOE se nejprve zvyšoval a poté klesal s rostoucí dobou lisování, zatímco MOR vykazoval rostoucí trend s dobou lisování. Doba lisování měla největší vliv na MOE, následovaná rychlostí nanášení lepidla a lisovacím tlakem (Yang et al., 2023).

V jiné studii byla prokázána nutnost úpravy lisovacího cyklu a rozdělení lisování na dva cykly při použití adhezivního systému složeného ze 2 % fenol-formaldehydové (PF) pryskyřice a 10 % hydrolyzovaného ligninu (vztaženo na suchá vlákna). PF pryskyřice nepůsobí pouze jako pojivo, ale přispívá také k rovnoměrné distribuci a dobrému zadržení hlavního pojiva – hydrolyzovaného ligninu. Byl použit specifický cyklus lisování za tepla. V prvním stupni byl tlak 1,0 MPa, následoval zvýšený tlak 4,0 MPa a následné ochlazení. Účelem počátečního nižšího tlaku bylo změkčení ligninu a snížení obsahu vlhkosti materiálu (Valchev et al., 2022).

Současný výzkum lisovacích procesů se tak zaměřuje především na vztah mezi typem vstupní suroviny, vlastnostmi lepidla, lisovacím tlakem, teplotou a dobou lisování. Tyto parametry zásadně ovlivňují pevnost lepené spáry, vnitřní soudržnost, rozměrovou stabilitu i chování materiálu při zvýšené teplotě. Z hlediska této práce je důležitá zejména slučitelnost lepicího systému se zpomalovači hoření a možnost zachování mechanických vlastností po protipožární úpravě.

3.3 Adhezivní technologie

Adhezivní spojování velkoformátových lignocelulózových prvků představuje klíčovou technologii v moderním stavebnictví a dřevozpracujícím průmyslu. Tento proces, spočívající ve spojování rozměrných panelů, laminátů či dých pomocí specializovaných adhezivních systémů, umožňuje realizaci pokročilých konstrukčních řešení a podporuje principy udržitelné produkce. Tato shrnuje hlavní faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje a zaměřuje se na kritické faktory ovlivňující efektivitu, stabilitu a strukturní integritu těchto spojů.

3.3.1 Faktory ovlivňující kvalitu adhezivního spoje

Výběr adheziva hraje klíčovou roli v kvalitě výsledného spoje velkoformátových materiálů na bázi dřeva. Fenol-formaldehydová, polyuretanová, epoxidová a melamin-formaldehydová lepidla se běžně používají díky svým dobrým adhezním vlastnostem, odolnosti vůči vlhkosti a širokým možnostem využití. Volba konkrétního adhezivního systému závisí především na požadovaných mechanických vlastnostech, podmínkách použití a technologii výroby (Masoumi et al., 2024).

Neméně důležitým faktorem je příprava povrchu lepených materiálů. Povrchy určené k lepení musí být čisté, rovné a bez nečistot, jež by mohly negativně ovlivnit tvorbu adhezivního spoje. Významnou roli hraje také orientace dřevních vláken, drsnost povrchu a obsah vlhkosti dřeva, jelikož tyto parametry ovlivňují penetraci adheziva a výslednou pevnost spoje (Biernacki et al., 1996).

Kvalitu spoje ovlivňuje rovněž způsob aplikace adheziva. Lepidla lze nanášet různými metodami, například válečkovým nanášením, stříkáním nebo clonovým nanášením. Rovnoměrná a kontrolovaná aplikace je nezbytná pro dosažení homogenního spoje a minimalizaci nadměrné spotřeby lepidla, která může vést ke vzniku slabých míst nebo delaminaci materiálu (Nociar et al., 2024).

Významnou část výrobního procesu představuje lisování a vytvrzování adheziva. Během této fáze jsou lepené materiály vystaveny působení teploty a tlaku, které aktivují chemické reakce vedoucí k vytvrzení lepidla. Pro tento účel se nejčastěji využívají hydraulické lisů. Přesná kontrola teploty, tlaku a doby lisování je nezbytná pro dosažení stabilních a dlouhodobě odolných spojů.

3.3.2 Močovino-formaldehydová adheziva (UF)

Močovino-formaldehydová (UF) adheziva představují v dřevozpracujícím a stavebním průmyslu dominantní skupinu termosetických pojiv, ceněnou pro schopnost vytvářet vysoce pevné a ekonomicky efektivní spoje. Jejich strukturní celistvost vzniká polykondenzační reakcí močoviny s formaldehydem za přísně kontrolovaných podmínek. Během této reakce dochází k tvorbě methylových skupin, které iniciují vznik rigidních trojrozměrných polymerních sítí prostřednictvím větvení molekulárních řetězců přes aminoskupiny močoviny (Dunky, 2003).

Vytvrzování UF lepidel je ovlivněno zejména molárním poměrem formaldehydu k močovině, typem katalyzátoru, teplotou, vlhkostí a lisovacím tlakem. Tyto faktory určují rychlost vytvrzení, pronikání lepidla do dřeva a výslednou pevnost lepeného spoje (Dunky, 2003).

3.3.2.1 Současné trendy ve výzkumu UF adheziv

Současný výzkum UF lepidel se zaměřuje především na snižování emisí formaldehydu, zlepšení odolnosti vůči vodě a využití přírodních nebo průmyslových vedlejších produktů. Jako plniva či modifikační složky byly zkoumány například buková kůra, zkapalněné dřevo, lignin nebo taniny. Tyto látky mohou snížit emise formaldehydu a zároveň zachovat nebo zlepšit pevnost lepeného spoje (Ružiak et al., 2017; Antonović et al., 2010; Wu et al., 2019; Gao et al., 2020; Xu et al., 2022).

3.3.3 Fenol-formaldehydová adheziva (PF)

Fenol-formaldehydová (PF) adheziva představují klíčovou skupinu termosetických polymerů, které jsou v průmyslových aplikacích oceňovány pro svou mimořádnou strukturní stabilitu a odolnost vůči degradaci. Tato pojiva vznikají polykondenzační reakcí fenolu s formaldehydem, jejímž výsledkem je rigidní trojrozměrná polymerní síť. Strukturní integrita PF adheziv je definována vznikem methylenových můstků, které vznikají kondenzací molekul formaldehydu na aromatická jádra fenolu (Dunky, 2003).

PF lepidla se vyznačují vysokou tepelnou a chemickou odolností, odolností vůči vodě a dlouhodobou stálostí spoje. Tyto vlastnosti jsou důležité zejména u materiálů vystavených vlhkosti, zvýšeným teplotám nebo požadavkům na požární odolnost. Nevýhodou PF systémů může být uvolňování formaldehydu, současný vývoj se proto zaměřuje na systémy s nižšími emisemi a na částečnou náhradu fenolu obnovitelnými surovinami (Dunky, 2003).

3.3.3.1 Současné trendy ve výzkumu PF adheziv

Dnešní výzkum PF lepidel se zaměřuje především na částečnou náhradu fenolu obnovitelnými surovinami. Perspektivní jsou zejména bio oleje a ligninové složky, které obsahují reaktivní fenolické struktury. Bylo prokázáno, že pyrolýzní olej z borového jehličí může při náhradě 10–20 % fenolu zachovat srovnatelné lepicí vlastnosti jako čistá PF pryskyřice (Ren et al., 2014; Jahan et al., 2022).

3.3.4 Melamin-formaldehydová adheziva (MF)

Melamin-formaldehydová (MF) adheziva představují další skupinu termosetických lepidel běžně používaných v průmyslových aplikacích, zejména v dřevozpracujícím, nábytkářském a stavebním sektoru. Tato lepidla vznikají reakcí melaminu s formaldehydem, jejímž výsledkem jsou pevné a trvanlivé polymerní struktury vykazující vysokou odolnost vůči působení vnějších vlivů.

MF lepidla se vyznačují vysokou pevností spoje, chemickou odolností, barevnou stálostí a u některých systémů také vyšší odolností vůči UV záření. Využívají se zejména tam, kde je požadována dobrá mechanická odolnost, stálost vzhledu a odolnost vůči vlhkosti nebo chemickému zatížení (Dunky, 2003; Pizzi, 2003).

3.3.4.1 *Současné trendy ve výzkumu MF adheziv*

Výzkum MF a MUF lepidel se zaměřuje zejména na snižování emisí formaldehydu a využití přírodních modifikátorů. Sledováno bylo například přidávání PVAc nebo ligninu, které může snížit obsah volného formaldehydu a současně ovlivnit pevnost, pružnost a tepelnou stabilitu spoje. Perspektivní jsou také systémy na bázi proteinů, ligninu, škrobu nebo taninů. Ty však většinou vyžadují další ověření před širším průmyslovým použitím (Kim & Kim, 2005; Dan et al., 2023; Li et al., 2023; Ma et al., 2023).

3.3.5 Izokyanátová adheziva (MDI)

Izokyanátová adheziva, zejména systémy založené na methylen-difenyl-diizokyanátu (MDI), představují skupinu vysoce výkonných lepidel známých svými výjimečnými adhezními vlastnostmi a širokým spektrem využití. Lepidla na bázi MDI nacházejí uplatnění především ve stavebnictví, automobilovém a leteckém průmyslu, ale také při výrobě konstrukčních materiálů na bázi dřeva.

MDI lepidla se vyznačují rychlým vytvrzováním, vysokou pevností spoje, nízkým smrštěním a dobrou odolností vůči teplotnímu namáhání. Jejich vytvrzování probíhá reakcí izokyanátových skupin s vlhkostí. Při práci s těmito systémy je ovšem nutné dodržovat zvýšená bezpečnostní opatření vzhledem k možným zdravotním rizikům spojeným s izokyanáty (Dunky, 2003; Weaver & Owen, 1995).

3.3.5.1 *Současné trendy ve výzkumu MDI adheziv*

Současný výzkum izokyanátových lepidel sleduje možnost částečného využití obnovitelných surovin. Příkladem je vodné polymer-izokyanátové lepidlo na bázi syrovátkového proteinu, jehož pevnost spoje byla srovnatelná s komerčními API systémy (Gao et al., 2011).

3.3.6 **Polyuretanová adheziva (PUR)**

Polyuretanová (PUR) adheziva představují vysoce univerzální skupinu reaktivních systémů, které se vyznačují vynikající adhezí k širokému spektru materiálů. Jejich tvorba je založena na principu polyadice, při níž dochází k chemické reakci mezi vícesytnými alkoholy (polyoly) a sloučeninami obsahujícími izokyanátové skupiny (polyizokyanáty) (Mastela et al., 2025).

Základem syntézy polymerní sítě je reakce hydroxylové skupiny polyolu s izokyanátovou skupinou, při níž vzniká uretanová vazba. Výsledné vlastnosti adheziva jsou ovlivněny chemickou strukturou použitých surovin, jejich funkčností a vzájemným poměrem (Ebrahimi et al., 2025).

Vytvrzování polyuretanových systémů vede ke vzniku prostorově zesítněné polymerní sítě. Hustota síťování ovlivňuje mechanickou pevnost, tuhost, pružnost i rychlost vytvrzení. Díky vysoké variabilitě lze PUR systémy přizpůsobit širokému spektru aplikací, od tuhých konstrukčních spojů až po pružné spoje vystavené dynamickému namáhání (Bernaczyk et al., 2026; Yusuf et al., 2026).

3.3.6.1 *Současné trendy ve výzkumu PUR adheziv*

Aktuální výzkum PUR lepidel se zaměřuje zejména na zvýšení tepelné a hydrolytické stability, využití obnovitelných surovin a úpravu vlastností pomocí vhodných katalyzátorů nebo plniv. Rozvíjejí se také polyuretanové systémy částečně založené na biologických surovinách, například na derivátech kyseliny mléčné. Z hlediska této disertační práce je důležité především chování PUR lepidel při zvýšené teplotě a jejich možná interakce se zpomalovači hoření (Vallejos et al., 2023; Ghazal et al., 2023; Fehrmann et al., 2023; Wang et al., 2023).

3.4 Topografie povrchu jako determinant pevnosti spoje

Kvalita adhezivního spoje je významně ovlivněna fyzikálně-chemickými vlastnostmi a tvarem a stavem kontaktních ploch lepeného materiálu. Interakce na fázovém rozhraní mezi adhezivem a lepeným materiálem zásadně ovlivňuje výslednou mechanickou celistvost, strukturní stabilitu a životnost spoje. Proces adheze je založen na komplexních molekulárních interakcích na mikroskopické úrovni, zahrnujících fyzikální síly (např. van der Waalsovy síly, vodíkové vazby) i případnou tvorbu primárních chemických vazeb. Efektivita těchto mechanismů přímo podmiňuje schopnost systému vytvářet homogenní a odolnou přechodovou vrstvu, která je klíčová pro přenos vnějšího zatížení v rámci celého aglomerovaného materiálu na bázi dřeva (Naumovski et al., 2025).

3.4.1 Povrchová energie a smáčivost

Povrchová energie označuje energii potřebnou ke zvětšení plochy povrchu materiálu. Ovlivňuje smáčení a rozprostírání lepidla na podklad. Polární a nepolární složky povrchové energie, měřené v $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$, ovlivňují afinitu mezi lepidlem a lepeným materiálem. Vlastnosti povrchové energie hrají zásadní roli při lepení a ovlivňují způsob interakce lepidel s různými substráty. Povrchová energie se skládá z polárních a disperzních složek, z nichž každá ovlivňuje různé aspekty smáčení, rozprostírání a tvorby adhezivního spoje (Naumovski et al., 2025).

Polární složka povrchové energie souvisí s přítomností polárních funkčních skupin na povrchu, jako jsou hydroxylové (OH), karbonylové (C=O) nebo aminoskupiny (NH₂). Tyto skupiny vytvářejí určitý stupeň polarity na povrchu, což vede k interakcím s polárními molekulami, jako například s vodou nebo některými typy lepidel.

Z hlediska smáčení vykazují povrchy s vyšší polární složkou lepší smáčivost polárními lepidly. Polární skupiny lepidla reagují nebo vzájemně působí s polárními místy podkladu, což vede k lepšímu rozprostření lepidla a zvětšení kontaktní plochy. Z hlediska adheze vykazují polární lepidla, například některé polyuretanové systémy, dobrou přilnavost k polárním povrchům díky vzájemným polárním interakcím (Naumovski et al., 2025).

Disperzní složka povrchové energie vzniká působením disperzních sil, což jsou slabé mezimolekulární síly přítomné ve všech materiálech. Tyto síly jsou výsledkem dočasných změn v rozložení elektronů. Disperzní složka přispívá k celkové povrchové energii a ovlivňuje smáčivost i u nepolárních lepidel. Nepolární lepidla mohou interagovat s povrchy, u nichž dominují disperzní síly, avšak dosažení vysoké adheze často vyžaduje optimalizaci dalších

faktorů. Disperzní síly se rovněž podílejí na interakcích mezi adhezivem a drsným povrchem, čímž podporují mechanické ukotvení spoje (Ebnesajjad & Ebnesajjad, 2013).

Pro dosažení optimálního lepení by měla být povrchová energie lepidla a podkladu vzájemně kompatibilní. Zatímco polární interakce jsou důležité zejména u polárních podkladů, disperzní síly a drsnost povrchu přispívají k lepení širokého spektra materiálů. Správná příprava povrchu, včetně čištění a vhodné úpravy, může výrazně ovlivnit povrchovou energii a tím zlepšit smáčení a přilnavost lepidla (Ebnesajjad & Ebnesajjad, 2013).

3.4.2 Současné trendy ve výzkumu povrchové energie

Současný výzkum je zaměřen na úpravu povrchu dřeva s cílem zvýšit jeho povrchovou energii, zlepšit smáčivost a následně zvýšit pevnost adhezivních spojů.

Studie zaměřená na dřevo *Pinus massoniana* ošetřené plazmou hodnotila vliv plazmové modifikace na lepicí vlastnosti a povrchové charakteristiky materiálu. Výsledky ukázaly, že po plazmovém ošetření došlo k výraznému snížení kontaktního úhlu a současně k významnému zvýšení povrchové energie dřeva (Tu et al., 2023).

Další studie se zabývala využitím UV záření pro úpravu povrchových vlastností dřeva určeného pro lepení s různými polymerními systémy. Bylo prokázáno, že UV záření svým působením na povrch dřeva zlepšuje pevnost ve smyku i úhel smáčení u různě opracovaného bukového dřeva (*Fagus sylvatica L.*) (Gržan et al., 2023).

Významným směrem výzkumu je také využití nanočástic. V případě škrobových lepidel bylo prokázáno, že přidavek nano-TiO₂ zlepšuje smáčivost povrchu a zvyšuje účinnost lepidla. Výsledky ukázaly, že menší částice nano-TiO₂ vedou ke zvýšení účinnosti škrobových lepidel na dřevo (Xing et al., 2023).

Problematika povrchové energie je významná také při vývoji hydrofobních a superhydrofobních povrchových úprav dřeva. Příkladem je vytvoření superhydrofobního perfluor-decal-trichlor-silanu (PFDTs), který výrazně omezuje interakci povrchu s vodou (Shao et al., 2023).

3.4.3 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu představuje základní parametr mikrogeometrie, který charakterizuje soubor geometrických nepravidelností a odchylek skutečného profilu od ideální roviny. V materiálovém inženýrství a technologii zpracování aglomerovaných materiálů na bázi dřeva se jedná o významný faktor ovlivňující funkční vlastnosti materiálu, stabilitu adhezních spojů a celkovou kvalitu výsledného produktu.

K popisu drsnosti se používají standardizované parametry, například R_a , R_z , R_q nebo R_t . Tyto hodnoty vyjadřují průměrnou drsnost, výšku nerovností a celkový rozdíl mezi vrcholy a prohlubněmi povrchu. V technické praxi se podle potřeby sledují také další parametry, například tvar profilu nebo vzdálenost mezi jednotlivými nerovnostmi.

K popisu drsnosti se používají standardizované parametry, například R_a , R_z , R_q nebo R_t . Tyto hodnoty vyjadřují průměrnou drsnost, výšku nerovností a celkový rozdíl mezi vrcholy a prohlubněmi povrchu. V technické praxi se podle potřeby sledují také další parametry, například tvar profilu nebo vzdálenost mezi jednotlivými nerovnostmi.

Volba parametrů drsnosti závisí na požadavcích konkrétní aplikace, výrobním procesu a požadovaných vlastnostech materiálu. Drsnost povrchu lze měřit pomocí profilometrů nebo mikroskopů atomárních sil (AFM). Metody měření a vyhodnocení jsou standardizovány prostřednictvím norem ISO a dalších technických předpisů (Adamčík et al., 2023; Chuchala et al., 2023).

3.5 Retardéry hoření a mechanismy požární ochrany dřeva

Retardéry hoření představují skupinu chemických látek nebo jejich směsí, jejichž úkolem je zpomalit začátek hoření, snížit rychlost šíření plamene a omezit uvolňování tepla během termické degradace materiálu. V případě materiálů na bázi dřeva jsou retardéry využívány zejména ke zvýšení požární bezpečnosti konstrukcí a ke zlepšení klasifikace reakce na oheň. Jejich aplikace umožňuje rozšířit využití dřevních materiálů v konstrukčních i nekonstrukčních aplikacích při současném zachování jejich mechanických a užitných vlastností (Horrocks & Price, 2008; Lowden & Hull, 2013).

Mechanismus účinku retardérů hoření může probíhat v plynné i tuhé fázi. V plynné fázi dochází k omezení radikálových reakcí zodpovědných za rozvoj plamene, zatímco v tuhé fázi

retardéry podporují tvorbu ochranné zuhelnatělé vrstvy (charu), která omezuje přenos tepla a přístup kyslíku k materiálu. Výsledkem je zpomalení procesu pyrolýzy a snížení intenzity hoření (Horacek & Grabner, 1996; Lowden & Hull, 2013).

Z hlediska chemického složení lze retardéry používané pro ochranu dřeva rozdělit zejména na systémy na bázi bóru, fosforu, dusíku, kovových hydroxidů a jejich vzájemných kombinací. Současný výzkum je zaměřen nejen na zvyšování účinnosti těchto systémů, ale také na minimalizaci jejich vlivu na mechanické vlastnosti materiálu, emisní charakteristiky a environmentální dopady během celého životního cyklu výrobku (Baysal et al., 2007; Lowden & Hull, 2013).

3.5.1 Retardéry na bázi bóru

Retardéry na bázi bóru patří mezi nejdéle používané prostředky pro zvýšení požární odolnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva. Jejich význam spočívá nejen ve schopnosti zpomalovat proces hoření, ale také v současném biocidním účinku proti dřevokazným houbám a hmyzu. Mezi nejčastěji používané sloučeniny patří kyselina boritá, tetraboritan sodný (borax), pentaboritan amonný a oxid boritý.

Mechanismus účinku boritých retardérů je založen především na podpoře tvorby ochranné zuhelnatělé vrstvy během termické degradace dřeva. Při zvýšených teplotách dochází k dehydrataci lignocelulózové matrice, omezení tvorby hořlavých těkavých produktů a zvýšení výtěžnosti uhlíkatého zbytku (charu). Vzniklá ochranná vrstva zpomaluje přenos tepla do vnitřních vrstev materiálu a omezuje přístup kyslíku k povrchu.

Významnou výhodou boritých sloučenin je jejich relativně nízká toxicita, dobrá kompatibilita s řadou adhezivních systémů a schopnost účinně snižovat rychlost šíření plamene. Nevýhodou je naopak jejich zvýšená rozpustnost ve vodě, která může vést k postupnému vyluhování z materiálu při dlouhodobém působení vlhkosti. Z tohoto důvodu jsou současné výzkumy zaměřeny zejména na stabilizaci boritanů v dřevní matici a jejich kombinaci s dalšími typy retardérů hoření (Horacek & Grabner, 1996; Baysal et al., 2007).

Baysal et al. (2007) prokázali, že impregnace dřeva douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii*) boritými sloučeninami zvýšila požární odolnost, snížila rychlost hoření a podpořila tvorbu zuhelnatělé vrstvy.

3.5.1.1 *Kyselina boritá a tetraboritan sodný*

Kyselina boritá (H_3BO_3) a tetraboritan sodný ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), běžně označovaný jako borax, patří mezi nejčastěji používané borité sloučeniny. Díky rozpustnosti ve vodě jsou vhodné pro impregnační aplikace a mohou pronikat do buněčné struktury dřeva. Při zvýšených teplotách podporují dehydrataci lignocelulózových složek, tvorbu zuhelnatělé vrstvy a omezení hořlavých těkavých produktů. Jejich výhodou je nízká toxicita, snadná aplikace a současný fungicidní a insekticidní účinek. Hlavním omezením zůstává možnost vyluhování při dlouhodobém působení vlhkosti.

3.5.1.2 *Současné poznatky o využití boritanových retardérů*

Boritanové sloučeniny ovlivňují průběh pyrolýzy lignocelulózových materiálů především podporou dehydratace polysacharidů a zvýšením množství zuhelnatělého zbytku. Tím se snižuje množství hořlavých plynů uvolňovaných do plamenné zóny a omezuje se intenzita hoření. Při zahřívání mohou vznikat oxidy bóru a sklovité ochranné struktury, které dále omezují přístup kyslíku a přenos tepla. Ve spektrech FTIR jsou pro tyto látky typické pásy vazeb B–O a B–O–B, obvykle v oblasti $800\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, a pásy O–H v oblasti $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ (Horacek & Grabner, 1996; Li et al., 2016; Kopylova et al., 2026).

3.5.2 Retardéry na bázi fosforu a dusíku

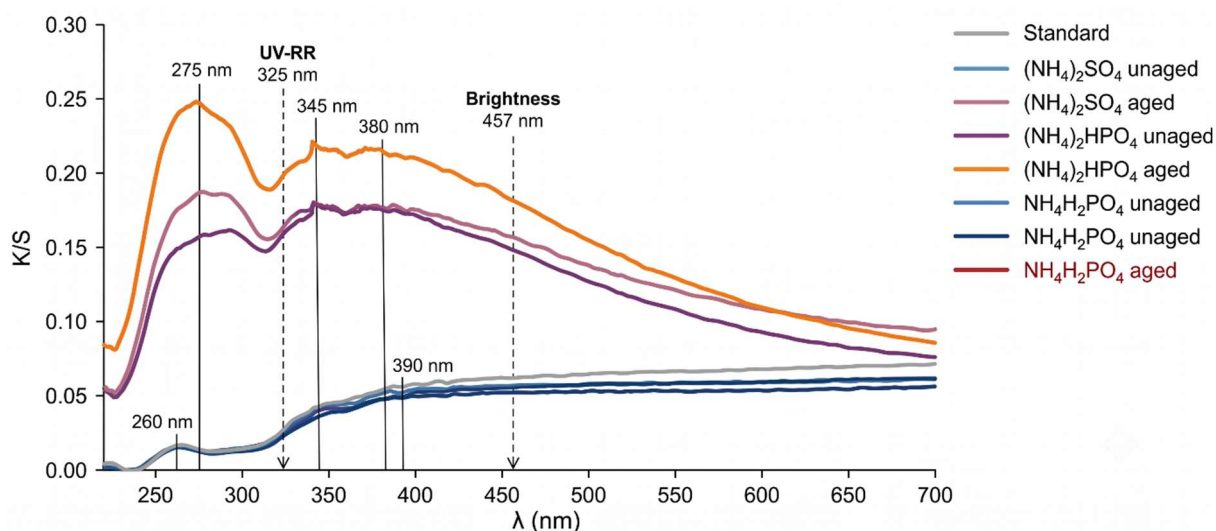
Fosforečné a dusíkaté retardéry hoření patří mezi nejvýznamnější skupiny současně používaných ochranných systémů pro materiály na bázi dřeva. Jejich popularita vychází především z vysoké účinnosti při relativně nízkých koncentracích, dobré kompatibility s lignocelulózovými materiály a možnosti vytváření synergických účinků mezi jednotlivými složkami. Na rozdíl od některých halogenových retardérů vykazují příznivější dopad na životní prostředí a nižší produkci toxických zplodin během hoření (Horrocks & Price, 2001; Pizzi, 2016).

Mechanismus jejich účinku je založen především na podpoře tvorby ochranné zuhelnatělé vrstvy, omezení tvorby hořlavých těkavých produktů a snížení přenosu tepla do hlubších vrstev materiálu. Fosforečné sloučeniny působí zejména v kondenzované fázi, kde podporují dehydrataci polysacharidů a vznik stabilního charu. Dusíkaté složky současně přispívají k uvolňování nehořlavých plynů, které snižují koncentraci kyslíku v okolí plamene. Kombinace fosforu a dusíku proto představuje jeden z nejúčinnějších principů současných

retardérů hoření používaných pro ochranu dřeva a materiálů na bázi dřeva (Horrocks & Price, 2001).

3.5.2.1 Výbrané fosforečné a dusíkaté zpomalovače hoření

Mezi významné fosforečné a dusíkaté zpomalovače hoření patří polyfosforečnan amonný (APP), hydrogenfosforečnan diamonný (DAP) a dihydrogenfosforečnan amonný (MAP). APP je využíván zejména v napěňovacích systémech, protože při zahřívání podporuje vznik kyseliny fosforečné a polyfosforečných struktur. DAP a MAP jsou díky dobré rozpustnosti ve vodě vhodné pro impregnační aplikace. Při tepelném rozkladu podporují dehydrataci lignocelulózových složek, tvorbu zuhelnatělé vrstvy a omezení uvolňování hořlavých těkavých látek. Jejich nevýhodou může být vyšší náchylnost k vyluhování při dlouhodobém působení vlhkosti.



Obr. 1 UV-Vis difúzní reflektanční spektra vzorků upravených fosforečnany a amoniakálními sloučeninami. (Loureiro et al., 2011)

3.5.2.2 Současné poznatky o fosforečných a dusíkatých retardérech

Ve spektrech vzorků ošetřených fosforečnany a amoniakálními sloučeninami byly identifikovány charakteristické absorpční pásy při přibližně 260, 275, 345 a 380 nm (Obrázek 1). Tyto absorpční oblasti souvisejí s přítomností rozkladných produktů lignocelulózových složek a vznikem chromoforních struktur během procesu stárnutí dřeva (Tribulová, 2016; Theander et al., 1988; Telemann et al., 1996; Sevastyanova et al., 2006). Absorpční pás v oblasti 260 nm je spojován zejména s přítomností furanových aldehydů

a kyselin vznikajících degradací sacharidů, zatímco pásy v oblasti 345 a 380 nm naznačují přítomnost konjugovaných karbonylových struktur, chinoidních a fenonových chromoforů (Theander et al., 1988; Teleman et al., 1996; Sevastyanova et al., 2006; Loureiro et al., 2011; Holthuis et al., 1998; Holthuis et al., 1985).

Spektrální intenzity jednotlivých vzorků se lišily v závislosti na použité impregnační látce i stupni stárnutí materiálu. Nejvyšší spektrální intenzitu vykazovaly vzorky ošetřené hydrogenfosforečnanem diamonným $((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$, zatímco nižší hodnoty byly zaznamenány u vzorků ošetřených dihydrogenfosforečnanem amonným $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$ a síranem amonným $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$. Výsledky naznačují, že použité fosforečné a dusíkaté retardéry významně ovlivňují průběh chemických změn probíhajících během stárnutí dřeva a tvorbu chromoforních struktur odpovědných za změny jeho optických vlastností (Tribulová, 2016).

3.5.3 Shrnutí dosavadních poznatků o retardérech hoření

Z vědeckých studií vyplývá, že anorganické ochranné látky mohou vyvolávat chemické změny složek dřeva. Dosavadní práce se zaměřovaly především na způsob aplikace, fixaci látek v materiálu a odolnost vůči vyluhování. Sledován byl také vliv těchto látek na hygroskopické chování, korozi kovových spojovacích prvků a celkovou termickou i rozměrovou stabilitu dřevní hmoty. Ta může být zhoršena v důsledku rekrystalizace anorganických solí po desorpci vlhkosti, což vede k vnitřnímu napětí v matrici (Guizhen et al., 2000; Crawford et al., 2002; Cook, 2003; Zelinka & Glass, 2010; Sonowal & Gogoi, 2010).

Chemické látky aplikované v ochranných systémech penetrují do ultrastruktury dřeva a mohou reagovat s jeho hlavními složkami, tedy s polysacharidy, ligninem a extraktivními látkami (Pandey, 1998). Důsledkem těchto změn může být snížení stupně polymerace polysacharidů, změny ligninové struktury, hydrolýza, depolymerizace nebo oxidace.

Významnou roli mohou hrát rovněž kationty kovů, které interagují s extraktivními látkami dřeva. Tyto reakce mohou způsobovat barevné změny a podporovat vznik radikálových center, které následně urychlují oxidační rozklad složek dřeva (Blattner & Ferrier, 1985).

Uvedené procesy probíhají současně a vzájemně se ovlivňují. Přesný podíl jednotlivých reakcí na celkovém rozkladu dřeva však dosud nebyl plně objasněn. Rychlost těchto dějů zvyšuje zejména teplota, vlhkost a koncentrace reaktivních chemických látek. Rozsah změn

závisí na vlastnostech dřeva, chemickém složení impregnačních látek a podmínkách expozice (Tribulová, 2016; Hill et al., 1995).

Fyzikálně-chemické vlastnosti retardérů významně ovlivňují jejich aplikační možnosti, schopnost penetrace do dřevní struktury, odolnost vůči vyluhování i celkovou účinnost během hoření. Důležitá je zejména rozpustnost ve vodě, tepelná stabilita, molární hmotnost a schopnost tvorby ochranné zuhelnatělé vrstvy. U fosforečných a dusíkatých systémů je důležité také to, že při zahřívání vzniká kyselina fosforečná, polyfosforečné struktury a nehořlavé plyny obsahující dusík. Tyto produkty podporují dehydrataci dřeva, tvorbu uhlíkaté vrstvy a snížení koncentrace kyslíku v okolí hořícího materiálu (Horacek & Grabner, 1996; Horrocks & Price, 2001).

Z hlediska této disertační práce je podstatné, že volba zpomalovače hoření musí zohledňovat nejen jeho požární účinnost, ale také slučitelnost s lepicím systémem, možnost fixace v materiálu a vliv na mechanické vlastnosti aglomerovaného materiálu na bázi dřeva.

3.6 Hoření dřeva a termická degradace lignocelulózové matrice

Dřevo je z pohledu požární bezpečnosti specifickým konstrukčním materiálem, jehož chování při zvýšených teplotách je určováno složitými fyzikálně-chemickými procesy probíhajícími v lignocelulózové matrici. Působením tepla dochází k postupné degradaci hlavních biopolymerních složek dřeva, vzniku těkavých hořlavých produktů a následné tvorbě zuhelnatělé vrstvy. Průběh těchto procesů významně ovlivňuje rychlost šíření požáru, intenzitu uvolňování tepla i zbytkovou únosnost konstrukce. Současný výzkum se zaměřuje nejen na samotný mechanismus termické degradace, ale také na možnosti jeho ovlivnění prostřednictvím retardérů hoření, konstrukčního řešení a modelování (Abou Rjeily et al., 2025; Dai et al., 2024; Emberley et al., 2017).

3.6.1 Mechanismus pyrolýzy

Pyrolýza představuje primární termochemický proces, při kterém dochází k nevratnému rozkladu organické hmoty za zvýšených teplot bez přístupu oxidačních činidel nebo s jejich omezeným přístupem. V kontextu dřevostaveb a aglomerovaných materiálů na bázi dřeva je pyrolýza kritickou fází, která předchází samotnému vzplanutí a významně ovlivňuje kinetiku

šíření požáru. Tento proces je proto zásadní pro hodnocení požárního chování dřeva i materiálů na jeho bázi (Abou Rjeily et al., 2025; Dai et al., 2024; Emberley et al., 2017).

Dřevní hmota se skládá ze tří hlavních biopolymerů, jejichž termická stabilita je odlišná. Současný výzkum se zaměřuje na určení jejich specifických teplotních intervalů rozkladu:

- Hemicelulózy (200–300 °C) – představují nejméně stabilní složku dřeva. K jejich rozkladu dochází prostřednictvím dehydratace a fragmentace polymerních řetězců za vzniku těkavých látek, jako jsou furfural a kyselina octová.
- Celulóza (300–400 °C) – její rozklad probíhá intenzivně prostřednictvím depolymerizace vedoucí ke vzniku levoglukosanu a následně hořlavých plynů.
- Lignin (160–900 °C) – vykazuje nejširší teplotní rozsah degradace díky své komplexní fenolické struktuře. Lignin představuje hlavní zdroj pevného uhlíkového zbytku – zuhelnatělé vrstvy (charu), která hraje klíčovou roli v pasivní požární ochraně (McNamee et al., 2021; Richter & Rein, 2020; Wang et al., 2020).

Současný vědecký trend se odklání od pouhého popisu teplotních intervalů a zaměřuje se na aktivní řízení tvorby zuhelnatělé vrstvy.

- Optimalizace tvorby zuhelnatělé vrstvy (charu) – dnešní výzkum potvrzuje, že zvýšení výtěžku pevného uhlíkového zbytku na úkor těkavých hořlavých produktů představuje jednu z nejúčinnějších cest k omezení intenzity hoření a zlepšení požárního chování materiálu. Toho lze dosáhnout pomocí aditiv, která katalyzují dehydratační reakce při nižších teplotách, např. fosforečnany (McNamee et al., 2021).
- Synergie v plynové a tuhé fázi – moderní retardéry působí současně v několika fázích. V plynové fázi mohou omezovat radikálové reakce odpovědné za šíření plamene, zatímco v tuhé fázi podporují vznik ochranné bariéry, která omezuje přístup kyslíku a prostup tepla. Od halogenovaných systémů se však v současnosti postupně ustupuje z důvodu jejich toxicity a environmentálních dopadů (Richter & Rein, 2020).
- Vliv anizotropie a hustoty – aktuální studie zdůrazňují vliv struktury dřeva, orientace vláken a hustoty materiálu na rychlost šíření pyrolýzní fronty. U aglomerovaných materiálů je významným směrem výzkumu také vliv adheziv na stabilitu pyrolýzních produktů. Například interakce UF pryskyřic s retardéry může ovlivňovat rychlost tvorby kouře a dalších degradačních produktů (Wang et al., 2020).

3.6.2 Současné trendy a problematika požární bezpečnosti dřevěných konstrukcí

Využití materiálů na bázi dřeva, zejména křížem lepeného dřeva (CLT), ve vícepodlažních budovách představuje jeden z nejvýznamnějších trendů současného stavebnictví. Tento vývoj je podporován snahou o snížení uhlíkové stopy stavebního sektoru, využívání obnovitelných materiálů a zrychlení výstavby (Liu & Fischer, 2022; Mitchell et al., 2022). Současně však přináší nové výzvy v oblasti požární bezpečnosti, které vyžadují odklon od tradičních tabulkových metod směrem k podrobnějšímu hodnocení požární odolnosti konstrukcí (Tawfik et al., 2026).

3.6.2.1 Požární dynamika a příspěvek paliva.

Zásadním specifikem konstrukcí z masivního dřeva je skutečnost, že samotná nosná struktura může během požáru fungovat jako aktivní palivo. Tato skutečnost výrazně ovlivňuje průběh požáru a odlišuje dřevěné konstrukce od konstrukcí založených na nehořlavých materiálech. Experimentální měření potvrzují, že prostory s obnaženým dřevem vykazují teploty o 80 až 180 °C vyšší ve srovnání s nehořlavými konstrukcemi (Hadden et al., 2017).

Vyšší tepelná zátěž vede k dřívějšímu nástupu celkového vzplanutí a k prodloužení fáze plně rozvinutého požáru. Současně dochází ke zvýšení intenzity uvolňování tepla (Heat Release Rate, HRR), která může být v přítomnosti nechráněných CLT panelů až dvojnásobná oproti obdobným prostorům bez exponovaných dřevěných prvků (Mitchell et al., 2022).

3.6.2.2 Mechanismus delaminace a samozhášení

Jedním z nejvýznamnějších témat současného výzkumu je jev delaminace, při kterém dochází k odpadávání zuhelnatělé vrstvy a následnému odhalování nepoškozeného dřeva. Tento proces je úzce spojen s tepelnou stabilitou použitých adheziv a kvalitou spojení jednotlivých vrstev materiálu (Bartlett et al., 2017).

V případě selhání adhezivního systému může docházet k opakovanému odhalování čerstvé dřevní hmoty, což vede k novému zvýšení intenzity hoření. Tento cyklický proces může významně prodlužovat dobu požáru a komplikovat dosažení samozhášení konstrukce. Schopnost samozhášení (auto-extinction) je přitom považována za jeden z klíčových parametrů požární bezpečnosti masivních dřevěných konstrukcí. Aby mohlo dojít k samozhášení, musí

rychlost úbytku hmotnosti klesnout pod kritickou hodnotu dříve, než dojde k rozsáhlé degradaci nosné struktury (Bartlett et al., 2017; Hadden et al., 2017).

Význam delaminace je v současnosti intenzivně studován zejména u CLT panelů a dalších vrstvených materiálů, kde vlastnosti použitého adheziva významně ovlivňují celkové požární chování konstrukce. Z tohoto důvodu se stále větší pozornost věnuje vývoji tepelně stabilních adhezivních systémů, které dokáží zachovat integritu spoje i při dlouhodobém působení vysokých teplot (Tawfik et al., 2026).

3.6.3 Modelování termické degradace a požárního chování dřeva

V oblasti předpovědi požárního chování dřeva a materiálů na bázi dřeva dochází v posledních letech k významnému rozvoji numerických modelů, jejichž cílem je omezit potřebu nákladných a časově náročných experimentálních zkoušek v reálném měřítku. Moderní modelovací přístupy umožňují simulovat přenos tepla, proces pyrolýzy, tvorbu zuhelnatělé vrstvy i následné šíření požáru v závislosti na vlastnostech materiálu a podmínkách prostředí (Stoliarov & Ding, 2023; Tawfik et al., 2026).

3.6.3.1 Pokroky v modelování a numerických simulacích

Pro simulaci víceukových termochemických reakcí a transportu tepla se využívají specializované numerické nástroje, mezi které patří například ThermaKin anebo Gpyro. Takové modely umožňují popsat proces degradace lignocelulózové matrice včetně tvorby pyrolýzních plynů, zuhelnatělé vrstvy a změn tepelných vlastností materiálu během požární expozice (Stoliarov & Ding, 2023).

Současný vývoj se zaměřuje na stále detailnější popis degradačních procesů probíhajících na různých úrovních struktury materiálu. Nejmodernějším směrem je využití metod molekulární dynamiky založených na reaktivních silových polích (ReaxFF MD). Tyto přístupy umožňují sledovat štěpení chemických vazeb biopolymerů na atomární úrovni a poskytují přesnější informace o vzniku meziproduktů pyrolýzy. Získaná data mohou následně sloužit jako vstupní parametry pro CFD modely simulující průběh požáru v reálném měřítku (Tawfik et al., 2026).

Významným trendem je rovněž propojování experimentálních metod, jako jsou termogravimetrická analýza (TGA), diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) a kónický

kalorimetr, s numerickými simulacemi. Tento přístup umožňuje zpřesňovat vstupní parametry modelů a zvyšovat jejich schopnost předpovědi pro různé druhy dřeva, adhezivní systémy i retardéry hoření (Richter & Rein, 2020).

3.6.3.2 Kinetická parametrizace a limity současného poznání

Přes výrazný pokrok v oblasti modelování zůstává stanovení přesných kinetických parametrů termické degradace významnou výzvou. Mezi nejdůležitější parametry patří aktivační energie (E_a), pre-exponenciální faktor (A) a reakční mechanismus degradace jednotlivých složek biomasy. Jejich stanovení je komplikováno heterogenní strukturou dřeva a souběhem mnoha paralelních a následných reakcí (Alvarado Flores et al., 2022).

Výzkumy ukazují značnou variabilitu výsledků v závislosti na použité metodě vyhodnocení, například při využití různých izokonverzních metod nebo modelově založených přístupů. Výsledné kinetické parametry se mohou lišit nejen mezi jednotlivými druhy dřevin, ale také v závislosti na hustotě materiálu, obsahu vlhkosti, přítomnosti adheziv nebo použitých retardérech hoření (Alvarado Flores et al., 2022; Adeniran et al., 2024).

Současné poznání naráží na několik zásadních omezení. Jedním z nich je nedostatek experimentálních dat získaných ve velkých prostorách, protože většina dosavadních studií byla realizována v malých místnostech o ploše menší než 50 m². Tyto podmínky však nemusí odpovídat skutečnému chování požáru v moderních otevřených kancelářských nebo obytných prostorech (Liu & Fischer, 2022).

Dalším problémem je nedostatečná standardizace některých experimentálních postupů, zejména při stanovování incidentního tepelného toku a podmínek ventilace. Tato skutečnost komplikuje vzájemné porovnání výsledků publikovaných studií a omezuje možnost jejich přímého využití při tvorbě univerzálních modelů (Liu & Fischer, 2022; Mitchell et al., 2022).

Významnou oblastí dalšího výzkumu zůstává také interakce mezi procesem pyrolýzy a různými režimy ventilace. Zejména podventilované požáry mohou výrazně ovlivňovat rychlost tvorby pyrolýzních produktů, složení kouře i mechanismus šíření požáru. Přesný popis těchto procesů je proto jedním z hlavních cílů současného požárního inženýrství (Tawfik et al., 2026).

Z uvedených poznatků vyplývá, že přes významný pokrok v oblasti modelování požárního chování dřeva stále existuje řada nevyřešených otázek. Budoucí výzkum bude

pravděpodobně směřovat k propojení experimentálních dat s numerickými modely a k přesnějšímu popisu interakcí mezi dřevní hmotou, adhezivními systémy, retardéry hoření a podmínkami požární expozice.

4 Metodika

Kapitola Metodika popisuje experimentální uspořádání studie a použité technologické a analytické postupy. Text je strukturován od detailní charakteristiky vstupních materiálů, přes procesy jejich modifikace, až po finální statistické a analytické vyhodnocení dat.

V úvodní části jsou popsány použité materiály a jejich fyzikálně-chemické vlastnosti, na což navazuje popis přípravy zkušebních těles, včetně definovaných podmínek kondicionování v souladu s příslušnými normativními standardy. Následující pasáže jsou věnovány instrumentálnímu vybavení, konfiguraci měřicích řetězců a stanovení parametrů zkušebních protokolů.

Závěrečná část kapitoly definuje metodiku matematického zpracování naměřených hodnot, využití výpočtové vztahy a komparativní kritéria. Tato ucelená struktura byla zvolena pro zajištění maximální transparentnosti, objektivity a plné reprodukovatelnosti celého experimentálního procesu.

4.1 Materiál

Kapitola věnovaná materiálům popisuje jednotlivé komponenty vyvíjeného aglomerovaného materiálu na bázi dřeva. Zaměřuje se na jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti a vzájemnou synergii. Text zahrnuje charakteristiku primární biomateriálové báze v podobě dýhových listů, analýzu chemických retardérů hoření s důrazem na jejich specifické termodegradační mechanismy a specifikaci adhezivních systémů zajišťujících výslednou strukturální kohezi. Tento ucelený přehled vstupů tvoří nezbytný základ pro následnou analýzu procesů modifikace a interpretaci požární bezpečnosti vyvíjeného aglomerovaného materiálu.

4.1.1 Analýza vstupní dřevní suroviny

Použitým materiálem pro výrobu zkušebních vzorků byly loupané dýhy ze smrkového dřeva (*Picea abies*). Dýhy byly získány od společnosti Wotan Forest, a.s., z výrobního závodu pro plošné materiály v Solnici, kde se vyrábějí lepené překližky. V závodě byly odebrány dýhy v kvalitě B, které byly následně upraveny na rozměr 100×20 cm.

Formátování proběhlo dvěma způsoby: polovina vzorků byla naformátována s průběhem vláken podél delší strany a druhá polovina tak, aby průběh vláken byl rovnoběžný s kratší

stranou. Tím bylo zajištěno, že při skládání vrstev budou jednotlivé vrstvy vůči sobě kolmé. Tloušťka jednotlivých dých činila 2 mm.

Výchozí fyzikální a mechanické vlastnosti byly určeny surovinou, tedy smrkovým dřevem, a technologickým zpracováním. Při výrobě byly přířezy nejprve napařeny a následně loupány, čímž vznikl nekonečný pás dýhy, který byl poté krájen a formátován na požadované rozměry.

Pro realizaci experimentů byly stanoveny základní fyzikální a mechanické vlastnosti smrkového dřeva dých, relevantní pro interpretaci výsledků:

- **Hustota (ρ)** (vzdušně suché, cca 12 % vlhkost): $350\text{--}500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- **Anizotropie:** Vlastnosti jsou silně závislé na směru vláken.
- **Pevnost v ohybu (MOR):** cca 60–90 MPa (v závislosti na vlhkosti a kvalitě materiálu).
- **Modul pružnosti v ohybu (MOE):** cca 8–12 GPa v podélném směru.
- **Směrová smyková pevnost:** přibližně 3–8 MPa.
- **Tvrdość:** 20–40 MPa pro povrch v podélném směru.
- **Součinitel tepelné vodivosti (λ):** 0,12–0,16 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- **Měrná tepelná kapacita (cp):** 1500–1700 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- **Sorpční kapacita a rovnovážná vlhkost:** při 20 °C/65 % RH $\approx$ 12 %; vlhkost výrazně ovlivňuje pevnost a hořlavost.

4.1.2 Použité systémy pro zpomalování hoření

Retardéry hoření se řadí do několika klíčových funkčních skupin, z nichž každá má specifické mechanismy působení při ochraně materiálů před požárem. Mezi základní funkční skupiny patří látky, které uvolňují vodu či inertní plyny při termické degradaci, čímž efektivně snižují teplotu povrchu a ochlazují ohnisko hoření. Další skupinu představují látky, které vytvářejí ochranné napěněné nebo zuhelnatělé vrstvy, jež omezuje přístup kyslíku a přenos tepla do materiálu. Některé látky mohou rovněž zachycovat volné radikály, čímž narušují mechanismy šíření plamene na molekulární úrovni. Balastní komponenty navíc působí jako fyzikální náplň, která zvyšuje tepelnou kapacitu materiálu a zabraňuje rychlému šíření tepla. Tato kombinace chemických a fyzikálních mechanismů činí retardéry hoření nenahraditelnými ve stabilizaci polymerů a kompozitů proti pyrolytickým a oxidačním účinkům v podmínkách vysoké teploty.

Tabulka 1 Souhrnná tabulka zpomalovačů hoření a jejich hlavní účinné mechanismy

Zpomalovače hoření	Účinné mechanismy			
	H ₂ O	CO ₂	Traper	Balast
Síran sodný			☆☆☆	☆☆☆
Dihydrogenfosforečnan amonný	☆☆☆		?	☆☆☆
Octan draselný		☆☆☆	☆☆☆?	☆☆☆
Dicyandiamid		☆☆☆	☆☆☆	
Černý louh	☆☆☆		?	☆☆☆

4.1.2.1 Síran sodný (Na_2SO_4)

Síran sodný byl použit ve formě 10% roztoku. Při expozici zvýšeným teplotám a následném termickém rozkladu vykazuje síran sodný specifický mechanismus účinku, který se liší od konvenčních aditiv. Jeho primární funkce nespočívá v masivním uvolňování plynné fáze v podobě vodní páry H₂O nebo oxidu uhličitého CO₂. Síran sodný v systému působí parciálně jako záchytné médium (tzv. trapper), schopné fixovat vybrané rozkladné produkty. Hlavní podstata jeho účinnosti však spočívá v tzv. balastním efektu. Vzhledem k tomu, že se jedná o rigidní, anorganickou a zcela nehořlavou substanci, funguje jako inertní rigidní fáze. Tento balast účinně snižuje koncentraci hořlavých složek v matrici, absorbuje teplo a omezuje jeho šíření, čímž významně přispívá k termické stabilizaci materiálu.

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

Dihydrogenfosforečnan amonný byl použit ve formě 20% roztoku. Při termické degradaci dihydrogenfosforečnanu amonného je dominantním procesem masivní generace vodní páry H₂O, která hraje klíčovou roli při ochlazování reakční zóny a diluci hořlavých plynů v plynné fázi. Oproti tomu jsou emise oxidu uhličitého CO₂ v průběhu tohoto rozkladu víceméně zanedbatelné či zcela absentují.

Z hlediska pokročilých inhibičních mechanismů hoření však zůstává otevřenou otázkou, do jaké míry je tato substance schopna působit jako efektivní záchytné médium (tzv. trapper)

volných radikálů, neboť exaktní míra této radikálové scavengery je stále předmětem diskusí a dalšího výzkumu. Mimo tvorby ochranné polyfosforečné vrstvy nicméně dihydrogenfosforečnan amonný parciálně plní také funkci inertního balastu. Pevné produkty jeho rozkladu totiž v materiálové matrici setrvávají jako nehořlavá rigidní složka, která přispívá k celkovému snížení podílu aktivního paliva a zpomalení kinetiky hoření.

4.1.2.3 Octan draselný (CH_3COOK) - 15%

Octan draselný byl použit ve formě 15% roztoku. V případě termického chování octanu draselného při zvýšené teplotní zátěži je uvolňování plynné vodní páry H_2O víceméně zanedbatelné. Naopak tato substance vykazuje extrémně vysokou efektivitu při generování oxidu uhličitého CO_2 v průběhu zahřívání, což představuje její dominantní projev v plynné fázi a klíčový prvek v mechanismu potlačení hoření.

Otázkou pro další výzkum nadále zůstává exaktní stanovení míry, do jaké octan draselný působí jako aktivní zachytné médium (tzv. trapper) volných radikálů. Nicméně recentní indicie a experimentální náznaky tuto potenciální schopnost radikálové inhibice podporují. Z hlediska působení v kondenzované fázi lze navíc předpokládat parciální zapojení této látky do balastního efektu. Tento mechanismus, kdy rigidní produkty rozkladu působí jako nehořlavá inertní složka, se však u octanu draselného projevuje pouze minoritně a jeho příspěvek je v porovnání s plynnou fází spíše marginální.

4.1.2.4 Dicyandiamid ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$)

Dicyandiamid byl použit v poměru 1:10 a byl přidáván do lepidla jako plnivo. Působí jako balastní složka se schopností zlepšit mechanické vlastnosti materiálu. Oproti ostatním použitým retardérům nemá v tabulce specifikovanou tvorbu vody nebo oxidu uhličitého, ale může přispívat ke zvýšení odolnosti materiálu vůči působení ohně, zejména prostřednictvím dusíkatých degradačních produktů a podpory tvorby stabilnějšího uhlíkatého zbytku.

4.1.2.5 Černý louh

Černý louh, použitý ve formě vodného roztoku z výroby bez dalšího ředění, pocházel ze sulfátového procesu výroby buničiny společnosti Mondi Štětí, a.s. Jedná se o významný

průmyslový vedlejší produkt, jehož složení obsahuje široké spektrum organických a anorganických látek.

Primární složkou černého louhu je lignin, což je stabilní přírodní polymer s komplexní strukturou, který hraje klíčovou roli v poskytování mechanických vlastností dřevěných materiálů. Lignin není polysacharid, ale fenolický biopolymer, který přispívá k pružnosti a pevnosti rostlinné struktury a má také výjimečné termální a chemické vlastnosti, které jej činí atraktivním pro aplikace zpomalení hoření.

Díky schopnosti interagovat s jinými organickými sloučeninami může lignin zvyšovat odolnost materiálu proti hoření a vytváří ochrannou vrstvu během spalování, čímž snižuje riziko šíření ohně. Složení černého louhu může rovněž zahrnovat fenolické sloučeniny, alkalické soli a další anorganické složky, které se mohou podílet na absorpci tepla, stabilizaci zuhelnatělého zbytku a omezení tvorby hořlavých těkavých produktů.

Jako balastní složka působí černý louh na zvýšení anorganického podílu a stability materiálu, čímž přispívá k jejich odolnosti vůči vysokým teplotám a omezuje rychlé šíření tepla. Díky tomu se černý louh stává nejen ekonomicky výhodnou přísadou, ale také potenciálně udržitelným řešením pro materiálové využití průmyslových vedlejších produktů v oblasti zpracování dřeva. Jeho střední účinnost jako balastní složky naznačuje, že i při omezeném samostatném účinku může významně přispět k ekologickému aspektu výroby a ke zvýšení stability kompozitního systému.

4.1.3 Termodegradační mechanismy použitých zpomalovačů hoření

Tato kapitola se zaměřuje na chemické přeměny zpomalovačů hoření aplikovaných v jednotlivých vrstvách překližovaného materiálu a na jejich kvantitativní promítnutí do navrženého matematického modelu zapálení a hoření. Zpomalovače působí prostřednictvím kombinace mechanismů v kondenzované i plynné fázi, které lze z hlediska požární dynamiky kategorizovat do čtyř klíčových procesů:

- **Pohlcování tepla:** v látce probíhají endotermní chemické či fázové děje spotřebovávající teplo, které nevedou k rozvoji řetězové reakce.
- **Uvolňování inertních plynných látek:** tento proces je zpravidla spojen s ochlazováním reakční zóny a snižováním koncentrace hořlavých plynů.
- **Podpora a stabilizace zuhelnatělé vrstvy:** formování stabilního charu nebo popelové vrstvy zásadně zvyšuje celkovou protipožární stabilitu systému.

- **Zhášení řetězové reakce:** tento mechanismus je realizován buď sekvestrací reaktivních radikálů, nebo omezením přístupu oxidantu, zejména kyslíku, k hořlavému substrátu. Často synergicky souvisí s předchozími mechanismy.

Každá látka zpomalovače hoření je charakterizována specifickým teplotním intervalem, unikátní kombinací těchto mechanismů a energetickou kapacitou probíhajících přeměn. Tímto způsobem retardanty přímo ovlivňují kinetiku pyrolýzy materiálu, rychlost generace těkavých produktů i stabilitu plamene. V této kapitole budou jednotlivé reakce specifikovány z hlediska teplotních oken, energetiky a produktů rozkladu a následně implementovány do rovnic pyrolýzy, transportu hmoty a energetické bilance tak, aby model realisticky zachytil vliv chemického složení vrstev na přechod od iniciace k samo šířícímu se hoření.

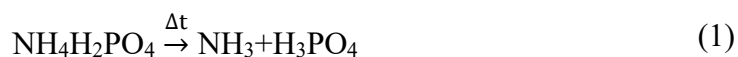
4.1.3.1 Dihydrogenfosforečnan amonný jako retardér hoření

Dihydrogenfosforečnan amonný $((\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4)$, označovaný také jako monoamonný fosforečnan, je typický P–N retardér působící dominantně v kondenzované fázi. Při zahřívání generuje kyselé sloučeniny fosforu, zejména kyselinu fosforečnou a polyfosforečné kyseliny, které katalyzují dehydrataci polysacharidů, čímž dochází k posunu termické degradace do nižších teplotních oblastí. Tento proces iniciuje urychlený přechod materiálu do fáze torifikace, která slouží jako prekurzor pro následnou tvorbu strukturně stabilní zuhelnatělé vrstvy (charu) na úkor úplné oxidace materiálu.

Takto změněný průběh rozkladu podporuje zachování větší části uhlíku v pevné fázi. Vznikající zuhelnatělá vrstva působí jako izolační bariéra a zpomaluje další prohořívání materiálu. Současně dochází k uvolňování těkavých nehořlavých složek, zejména H_2O a NH_3 , které krátkodobě ředí hořlavé plyny v blízkosti povrchu materiálu (Jia et al., 2024).

Rozklad $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ lze zjednodušeně popsat ve třech krocích:

Krok 1 – uvolnění amoniaku a vznik kyseliny fosforečné, přibližně 150–250 °C



V tomto kroku vzniká kyselé prostředí, které podporuje dehydrataci dřeva a následnou tvorbu charu.

Krok 2 – kondenzace fosforečných kyselin, přibližně 200–350 °C



Dochází ke vzniku polyfosforečných struktur a k uvolnění vody. Tyto produkty přispívají k soudržnosti charu a omezují propust hořlavých plynů.

Krok 3 – stabilizace fosforečných zbytků, přibližně nad 350 °C



V této fázi zůstává fosfor převážně v pevné fázi a podporuje stabilitu uhlíkatého zbytku. Z hlediska vrstveného materiálu je tento efekt důležitý zejména v místě, kde je zpomalovač hoření lokalizován v dýhové vrstvě.

Funkční klasifikace produktů rozkladu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Produkty rozkladu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ lze z hlediska retardačního mechanismu klasifikovat následovně:

- **H₂O:** vzniká v kroku 1 a 2, působí dilučně a současně jako endotermní tepelný sink.
- **CO₂:** typicky nevzniká jako primární produkt rozkladu $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, na rozdíl od karbonátů nebo acetátů.
- **SO₂:** nevzniká, protože molekula neobsahuje síru.
- **Trapper:** působení je spíše nepřímé; hlavní účinek spočívá v acidifikaci prostředí a podpoře tvorby charu.
- **Balast:** fosforečné zbytky zvyšují podíl pevné fáze a podporují vznik stabilnější zuhelnatělé vrstvy.

4.1.3.2 Síran sodný jako retardér hoření

Síran sodný (Na_2SO_4) je v teplotním intervalu 200–500 °C tepelně velmi stabilní. V impregnovaném dřevě proto nepůsobí jako typický aktivní retardér hoření, který by přímo zasahoval do počáteční pyrolýzy dřeva. Jeho význam spočívá především ve zvýšení podílu nehořlavé anorganické složky v materiálu. Tím může částečně zvyšovat tepelnou kapacitu

systému, snižovat relativní podíl hořlavé organické hmoty a přispívat ke vzniku pevnějšího minerálního zbytku na povrchu.

Vysokoteplotní tepelný rozklad síranu sodného na oxid sodný a oxid sírový může probíhat až při velmi vysokých teplotách, přibližně od 1200 °C a výše v závislosti na podmínkách prostředí. Tyto teploty jsou výrazně vyšší než oblast hlavní pyrolýzy dřeva, a proto tento děj nepředstavuje rozhodující mechanismus ochrany dřeva před vznícením. Lze jej chápat spíše jako doprovodný proces při extrémní tepelné zátěži (Karolin, et al., 2026; Rashad et al., 2012).

Při velmi vysoké teplotě může vznikat také oxid siřičitý. Ten může mít dílčí inhibiční účinek v plynné, avšak tento mechanismus není při běžném hodnocení požárního chování dřeva rozhodující. Navíc je nutné zohlednit i možné negativní technické a ekologické aspekty oxidů síry, zejména jejich toxicitu a korozivní působení (Dula & Kraszkiewicz, 2025).

Z hlediska požární ochrany dřeva má obecně větší význam schopnost zpomalovačů hoření ovlivnit pyrolýzu již v oblasti přibližně 250–350 °C. V této fázi dochází k tvorbě těkavých hořlavých produktů a zároveň může vznikat ochranná zuhelnatělá vrstva. U síranu sodného však tyto nízkoteplotní chemické účinky nejsou hlavním mechanismem.

Za extrémních teplotních podmínek může část anorganické složky přecházet do jiných minerálních forem, například na uhličitan sodný (Na_2CO_3). Tyto produkty se mohou podílet na tvorbě minerálního zbytku a částečně stabilizovat povrchovou vrstvu po hoření. Takový efekt však nastupuje až ve fázi, kdy je dřevo již výrazně tepelně rozloženo.

Oxid sodný může následně reagovat s oxidem uhličitým ze spalín za vzniku uhličitanu sodného (Na_2CO_3). Tím dochází k tvorbě minerálního zbytku na povrchu dřeva. Tyto povrchové složky popela mohou omezovat přístup tepla a kyslíku k dosud nerozloženému dřevu pod povrchem. V takovém případě se retardační účinek neprojevuje ani tak chemicky, jako spíše fyzikálně, tedy formací balastu, jenž zpomaluje další pyrolýzu a šíření plamene. Je však třeba zdůraznit, že tento mechanismus je podmíněn vznikem Na_2O , což je u Na_2SO_4 v běžném scénáři požáru dřeva málo pravděpodobné.

Proto nelze říci, že Na_2SO_4 působí jako typický aktivní retardér hoření ve smyslu včasného chemického zásahu do pyrolýzy dřeva. Jeho přínos je zejména v tom, že impregnované dřevo obsahuje vyšší podíl nehořlavé anorganické složky, která:

- zvyšuje tepelnou kapacitu materiálu,
- snižuje relativní množství hořlavé organické složky,
- může přispět k tvorbě kompaktnějšího zbytku po hoření,
- a částečně zpomaluje šíření tepla do hloubky dřeva.

Pro hodnocení požárního chování impregnovaného dřeva je však důležité zdůraznit, že reakce síranu sodného nejsou dominantní v počáteční fázi požáru. V této fázi je rozhodující především omezení tvorby těkavých hořlavých produktů z celulózy a hemicelulóz.

Případné alkalické minerální produkty mohou v pokročilé fázi tepelného zatížení částečně přispívat ke stabilizaci popelové nebo zuhelnatělé vrstvy. Tento mechanismus však nepředstavuje primární ochranu před vznícením, ale spíše doprovodný efekt v pozdější fázi hoření.

4.1.3.3 Octan draselný jako retardér hoření

Octan draselný (CH_3COOK) představuje z hlediska tepelné degradace specifický retardant. Na rozdíl od čistě anorganických solí nevystupuje pouze jako inertní minerální přísada, ale také jako organická sloučenina. Jeho rozklad generuje anorganický alkalický zbytek, ale i organické meziproducty schopné další pyrolýzy, karbonizace a sekundárních kondenzačních reakcí.

Při impregnaci dřeva je proto jeho účinek dvojitý:

- ovlivňuje primární pyrolýzu lignocelulózové matrice,
- vytváří alkalické draselné produkty, která následně napomáhají vzniku zuhelnatělé ochranné vrstvy.

V počáteční fázi tepelné expozice zůstává octan draselný převážně nerozložený. S rostoucí teplotou se však postupně rozkládá a jeho produkty mohou reagovat s produkty pyrolýzy celulózy, hemicelulóz a ligninu. To je důležité pro následnou tvorbu ochranné anorganicko-uhlíkaté vrstvy.

Při dostatečném přístupu kyslíku lze chování octanu draselného idealizovaně vyjádřit rovnicí úplné oxidace organické části za současného vzniku hydroxidu draselného:



Organický acetátový anion je při intenzivní oxidaci mineralizován na oxid uhličitý a vodu, zatímco draslík přechází do formy alkalického anorganického rezidua. Dokonalá oxidace se uplatňuje především v povrchové plamenné zóně. V reálném požáru dřeva však tento mechanismus nepředstavuje jedinou ani dominantní cestu. Uvnitř materiálu převládají spíše lokální podmínky chudé na kyslík. Přesto je znalost totální oxidace důležitá, neboť ukazuje, že

při rozvinutém hoření může být draslík přítomen ve formě vysoce reaktivních alkalických sloučenin, které se podílejí nejen na zuhelnatění, ale i na dějích v plameni.

Za podmínek omezeného přístupu kyslíku je vhodné uvažovat především ketonizační dekarboxylaci, při níž vzniká uhličitán draselný a aceton:



Tato reakce je pro alkálie a soli karboxylových kyselin typická a z hlediska retardace hoření mimořádně významná. Vznikající uhličitán draselný, K_2CO_3 , představuje stabilní anorganický zbytek, jenž zůstává v kondenzované fázi a podílí se na tvorbě minerálně modifikované zuhelnatělé vrstvy. Vznikající aceton je těkavý meziprodukt, který může dále podléhat sekundární pyrolýze. Tím se celý systém rozděluje na dvě chemicky odlišné větve: na anorganickou draselnou větev, zodpovědnou za usnadnění karbonizace a tvorbu rezidua, a na organickou těkavou větev, z níž vznikají plyny, lehké uhlovodíky, oxidy uhlíku a sekundární uhlikatý zbytek.

Vzniklý aceton není při vyšších teplotách konečným produktem. V prostředí rozkládajícího se dřeva může dále podléhat štěpení, kondenzaci a dehydrogenačním reakcím. Výsledkem mohou být nízkomolekulární plynné produkty a současně uhlikatý zbytek.

Draselné sloučeniny, zejména K_2CO_3 , KOH , mohou podporovat karbonizaci a úpravu struktury vznikajícího uhlikatého zbytku. Výsledná zuhelnatělá vrstva tak může být stabilnější a účinněji omezovat přenos tepla i hmoty.

Vysokoteplotní přeměny draselných sloučenin

Při vyšších teplotách se draselné anorganické produkty mohou vzájemně přeměňovat. V závislosti na teplotě, přístupu kyslíku, přítomnosti CO_2 , vodní páry a uhlikatého zbytku může docházet k přechodům mezi K_2CO_3 , KOH a K_2O . Tyto látky proto nelze ve zbytku po hoření chápat jako jedinou pevně danou sloučeninu, ale spíše jako skupinu vzájemně se měnících alkalických produktů.

Z hlediska zpomalování hoření není rozhodující samotná porozita zbytku, ale především to, že vznikající zuhelnatělá vrstva obsahuje tepelně stabilnější uhlikatou strukturu s příměsí anorganických draselných fází. Tím se zvyšuje její bariérový účinek vůči přenosu tepla a uvolňování hořlavých produktů.

Vliv CH_3COOK na pyrolýzu lignocelulózové matrice

Z pohledu retardačního účinku v dřevě je zásadní zejména to, že octan draselný nefunguje pouze jako samostatně se rozkládající látka, ale současně aktivně modifikuje pyrolýzu lignocelulózové matrice. Draselné ionty a jejich následné termické produkty katalyzují dehydratační a dekarboxylační reakce polysacharidů, omezují tvorbu levoglukosanu a dalších snadno zápalných dehtových produktů a posouvají rozklad dřeva směrem k vyššímu výtěžku pevného uhlíkatého zbytku. Jinými slovy, místo aby se značná část dřeva přeměnila na hořlavé těkavé látky podporující plamen, větší podíl uhlíku zůstává v kondenzované fázi jako char. Tím se snižuje rychlost uvolňování tepla i intenzita plamenného hoření.

Celkový účinek octanu draselného je proto vhodné chápat jako souhrn několika dějů: primárního rozkladu octanu, vzniku uhličitane draselného a organických meziproduktů, sekundární pyrolýzy těchto meziproduktů a následných přeměn draselných anorganických produktů.

Technologický význam octanu draselného

Z technologického hlediska je klíčové, že octan draselný začíná vykazovat svou retardační účinnost v teplotním intervalu 250–400 °C, což je rozmezí přímo korespondující s iniciační fází pyrolýzy a následným bodem vznícení dřevní hmoty. Na rozdíl od tepelně velmi stabilních anorganických sulfátů se jeho účinek uplatňuje již v oblasti hlavní pyrolýzy dřeva. To znamená, že může zasáhnout do mechanismu rozkladu ještě před plně rozvinutým plamenem, a tím snížit tvorbu těkavých hořlavých produktů. Současně vznikající draselné karbonátové a hydroxidové species přispívají k tomu, že vzniklá charová vrstva není pouze pasivní uhlíkatý zbytek, ale alkalicky modifikovaný uhlíkatý kompozit, který omezuje transport tepla do hloubky materiálu a zpomaluje další degradaci.

Celkově lze tedy uzavřít, že octan draselný představuje z hlediska požární ochrany dřeva mnohem aktivnější systém než čistě inertní anorganické plnivo. Jeho účinek je založen na kombinaci několika vzájemně provázaných mechanismů:

- primárního termického rozkladu s tvorbou uhličitane draselného a těkavých organických meziproduktů,
- sekundární pyrolýzy těchto meziproduktů za vzniku plynů a uhlíkatého rezidua,
- vysokoteplotních přeměn draselné anorganické fáze
- a především katalytického působení draslíku na karbonizaci lignocelulózové matrice.

Právě tato kombinace vede k omezení tvorby plamenně hořlavých produktů, ke zvýšení výtěžku charu a ke vzniku ochranné vrstvy, která je schopna účinně zpomalit další šíření tepelné degradace.

4.1.3.4 Černý louh jako retardér hoření

Černý louh z kraftového procesu obsahuje významný podíl ligninových fragmentů, hemicelulóz a ligninových polyfenolů spolu se solemi sodíku, síry a dalšími ionty. V impregnaci dřeva s černým louhem hraje roli dvojího charakteru:

- chemicko-fyzikální bariéra tvořená minerálním popelem a alkáliemi (Na^+ , S^- , K^+), která zvyšuje tepelnou kapacitu a omezuje průchod tepla a plyných hořavin,
- organicko-uhlíkaté reziduum, jehož vznik je ovlivněn přítomností ligninu s vysokou teplotní stabilitou a s vysokým podílem aromatických struktur.

Lignin samotný je v řadě případů vnímán jako přírodní termoplast, který při zahřátí měkne a vytváří na povrchu impregnovaného dřeva viskózní film, jenž redukuje kontaktní zónu mezi vlhkostí, teplem a chemickými složkami louhu. Tato kombinace vytváří unikátní retardační mechanismus: minerální vrstvy zvyšují izolaci a tvorba charu posiluje bariérový efekt, zatímco ligninový film a jeho karbonizované zbytky modulují průchod tepla a uvolňování produktů pyrolýzy (Gomes et al., 2025; Marins-Gonçalves & Reis, 2025; Gao, et al., 2026).

Účinek černého louhu je dán především současným působením organické ligninové složky a anorganických alkalických látek. Z tohoto důvodu jej nelze chápat jako jednoduchou jednosložkovou přísadu, ale spíše jako vícesložkový systém, který může ovlivňovat průběh tepelného rozkladu dřeva v několika teplotních oblastech.

Anorganická složka černého louhu může při vysokých teplotách přispívat k tvorbě minerálního zbytku. Síranové složky a alkalické soli se však uplatňují především jako doprovodné děje v pozdějších fázích tepelného zatížení. V počáteční fázi požáru nepředstavují hlavní aktivní mechanismus zpomalování hoření, ale mohou přispívat ke stabilizaci popelové a zuhelnatělé vrstvy.

Pokud jsou v systému přítomny draselné nebo sodné alkalické složky, mohou podporovat karbonizaci lignocelulózové matrice a modifikovat vznikající zuhelnatělou vrstvu. Tyto alkalické produkty mohou působit společně s ligninem a přispívat k vyšší stabilitě uhlíkatého zbytku.

Role ligninu a jeho interakce s alkáliemi

Lignin obsaženým v černém louhu při zahřátí zastává roli viskózní zahlazující a stabilizační vrstvy, která se na povrchu i ve vnitřních strukturách impregnovaného dřeva může roztavit a vytvořit adherentní film. Tento film funguje jako spojovací a stabilizační činidlo mezi mikrometrickými složkami dřeva a minerálním zbytkem louhu, čímž zvyšuje mechanickou pevnost povrchové vrstvy proti mechanickému a tepelnému namáhání.

Při vyšších teplotách lignin podléhá dehydrataci a karbonizaci, čímž vzniká porézní uhlíkaté reziduum, které dále spolupracuje s alkáliemi na tvorbě bariérové vrstvy.

Zjednodušeně lze říci, že lignin během tepelného zatížení přechází na těkavé produkty rozkladu a uhlíkatý zbytek. Přítomnost alkalických iontů, zejména Na^+ a K^+ , může tento proces posouvat směrem k vyšší tvorbě zuhelnatělé vrstvy a k její větší stabilitě.

Tvorba ochranné vrstvy a omezení kouřivosti

Kombinace ligninového filmového režimu, katalytické aktivity alkalických kovů a minerálního popela vede ke vzniku kompaktní, tepelně stabilní a částečně porézní charové vrstvy. Tato vrstva snižuje difuzi tepla, omezuje uvolňování těkavých hořlavých látek a zvyšuje schopnost dřeva odolávat působení plamene.

Ligninový film, který se vlivem teploty stává viskózním, zajišťuje lepší kontakt s povrchem a mikrostrukturou dřeva. Současně umožňuje, aby se část impregnační složky dostala hlouběji do struktury dýh, čímž podporuje stabilizaci povrchové i podpovrchové vrstvy vůči působení tepla a plamene.

Mezní teploty a praktické aplikační souvislosti

- **Měknutí ligninu:** přibližně 60–150 °C v závislosti na typu ligninu a příměsích. V tomto intervalu se vytváří viskózní film, který se chová jako adhezivní vrstva na povrchu i v pórech dřeva (Hatakeyama & Hatakeyama, 2009; Salmén, 1984).
- **Pyrolýza ligninu:** přibližně 250–500 °C. Dochází ke vzniku těkavých produktů a částečné karbonizaci, což vede k tvorbě charu a modifikaci mikrostruktury materiálu (Hatakeyama & Hatakeyama, 2009; Salmén, 1984).
- **Tvorba minerálního zbytku a katalytická aktivace:** přibližně 500–900 °C. Alkálie, zejména Na^+ , K^+ z černého louhu a degradovaných ligninových fragmentů, mohou katalyzovat dehydratační a karbonizační procesy, čímž posilují vznik husté, odolné a chemicky stabilní vrstvy.

- **Oxidace a přeměny síranů:** nad 700 °C. Dochází ke vzniku SO₂, SO₃ a jejich interakcím s okolím, které v kontextu retardace hoření hrají spíše okrajovou roli.

Celkově lze účinek černého louhu chápat jako souběh působení ligninu, alkalických složek a minerálního zbytku. V počátečních fázích ohřevu může lignin přispívat k tvorbě viskózní ochranné vrstvy, zatímco při vyšších teplotách dochází ke karbonizaci a stabilizaci vznikající zuhelnatělé vrstvy. Přítomnost alkalických a minerálních složek může tento proces dále podporovat. Výsledkem může být omezení kouřivosti, zpomalení uvolňování hořlavých produktů a prodloužení času do vznícení.

4.1.3.5 *Mechanismus retardačního účinku dicyandiamidu v adhezivním systému na bázi fenol-formaldehydové pryskyřice.*

Fenol-formaldehydové (PF) pryskyřice představují významnou skupinu termosetových adheziv s vysokou tepelnou stabilitou danou především jejich aromatickou strukturou a vysokým stupněm prostorového zesílení. Ve srovnání s aminoplastovými nebo polyuretanovými lepidly vykazují PF systémy při tepelném namáhání vyšší výtěžek pevného uhlíkatého zbytku, a proto jsou z hlediska požárního chování považovány za relativně stabilní adhezivní matrici.

Modifikace fenol-formaldehydové pryskyřice dicyandiamidem (DCD, C₂H₄N₄) dále ovlivňuje mechanismus její tepelné degradace, a to zejména prostřednictvím vnosu dusíku do polymerní sítě a podpory vzniku kondenzovaných dusíkatých struktur, které přispívají ke stabilizaci uhlíkatého zbytku.

Vytvrzená PF síť je tvořena fenolickými jádry propojenými převážně methylenovými a částečně také methylen-etherovými můstky. Díky vysokému podílu aromatických struktur je při tepelném zatížení méně náchylná k úplné fragmentaci a má vyšší sklon ke karbonizaci.

Nízkoteplotní oblast 150–180 °C

Při teplotách v rozmezí 150–180 °C probíhají v systému prioritně procesy fyzikálního charakteru, spojené s odstraňováním zbytkové vlhkosti a odparem nízkomolekulárních fragmentů. Současně však dochází k dalšímu dozesíťování strukturních nedokonalostí vytvrzené pryskyřice, realizovanému především prostřednictvím kondenzace reziduálních methylolových skupin.

Z hlediska retardace hoření je důležité, že tyto kondenzační děje mohou být spojeny s uvolněním vody. Její odpařování spotřebovává část tepla a vodní pára může současně ředit plynné produkty v mezifázové vrstvě.

Přítomnost dicyandiamidu (DCD) v této oblasti může dále stimulovat doplňkové kondenzační reakce, při nichž dusíkatá složka interaguje s volnými methylolovými nebo formaldehydovými fragmenty. Tento proces nejen zvyšuje hustotu sítě polymeru, ale může také zesilovat efekt uvolňování vody a nehořlavých plynů ještě před dosažením hlavního pyrolýzního rozkladu.

Skutečný mechanismus je v reálné formulaci složitější, proto je vhodnější jej popsat obecně jako možné zvýšení hustoty zesílení a stabilizaci lepené spáry před hlavním tepelným rozkladem.

Střední teplotní oblast 180–280 °C

V oblasti přibližně 180–280 °C začíná být tepelně aktivní samotný dicyandiamid. Jeho rozklad neprobíhá jednorázovým štěpením, ale zahrnuje sérii kondenzačních, deaminačních a cyklizačních reakcí, jejichž výsledkem jsou stabilnější dusíkaté heterocyklické struktury. Jednou z pravděpodobných cest je tvorba cyanamidových a guanidinových meziproductů a jejich následná konverze na melaminové deriváty.

Při těchto reakcích se může uvolňovat amoniak, tedy nehořlavý plyn, který v blízkosti povrchu částečně ředí hořlavé pyrolýzní produkty. Současně vznikají dusíkaté struktury, které zůstávají v pevné fázi a mohou podporovat tvorbu stabilnějšího uhlíkatého zbytku.

Hlavní rozklad PF sítě v intervalu 250–400 °C

V intervalu přibližně 250–400 °C nastává hlavní rozklad samotné fenol-formaldehydové sítě. Nejprve se štěpí méně stabilní methylen-etherové můstky, později také další vazby v polymerní síti. Vznikají fenolické fragmenty, formaldehyd, voda, oxid uhelnatý a oxid uhlíčitý.

Část vznikajících fragmentů však dále reaguje v pevné fázi, kde probíhá dehydrogenace, rekondenzace a aromatizace. Tím vzniká polyaromatický uhlíkatý zbytek. Právě schopnost PF pryskyřice přecházet při tepelném rozkladu do uhlíkatého rezidua je jedním z hlavních důvodů jejího příznivějšího požárního chování ve srovnání s méně aromatickými lepicími systémy.

Vznik dusíkem obohacené uhlíkaté vrstvy

V přítomnosti dicyandiamidu je proces termické degradace fenol-formaldehydové pryskyřice zásadně modifikován. Produkty kondenzace DCD, reprezentované zejména triazinovými a heptazinovými strukturami, představují důležité meziprodukty termické stabilizace. Heptazinové fragmenty lze považovat za tepelně stabilní jednotky, které mohou být inkorporovány do vznikajícího rezidua za vzniku dusíkem dopovaného charu (N-doped char).

Výsledná uhlíkatá vrstva je díky této dusíkaté modifikaci výrazně kompaktnější, vykazuje vyšší tepelnou stabilitu a nižší náchylnost k oxidativnímu rozpadu v pokročilých fázích tepelné expozice.

Ve vyšším teplotním intervalu, přibližně 400–600 °C, převažují v pevném zbytku procesy další aromatizace a deoxygenace. V této fázi již systém ztrácí většinu těkavých funkčních skupin a přechází do podoby vysoce kondenzovaného uhlíkatého rezidua s významným podílem aromatických struktur. Dusík z DCD může být vázán v heterocyklických formách, například jako pyridinický, pyrrolový nebo triazinový dusík, což dále zvyšuje termickou stabilitu zbytku.

Při dalším oxidačním namáhání může docházet k postupné oxidaci uhlíkaté vrstvy. V závislosti na teplotě a dostupnosti kyslíku mohou vznikat také menšinové dusíkaté zplodiny, například HCN nebo NO_x, což je vhodné zohlednit při celkovém hodnocení požární bezpečnosti dusíkem modifikovaných systémů.

Funkční význam PF/DCD systému

Z hlediska funkce adheziva při tepelném namáhání lze tedy konstatovat, že fenol-formaldehydová pryskyřice modifikovaná dicyandiamidem vykazuje při rozkladu výrazný sklon ke karbonizaci a současně omezenou produkci tavitelných či nízkomolekulárních rozkladných produktů ve srovnání s méně aromatickými polymerními soustavami. Přítomnost dicyandiamidu podporuje tvorbu dusíkatých kondenzačních struktur, zvyšuje výtěžek pevného zbytku a přispívá k uvolňování nehořlavých plynů, zejména amoniaku.

Z tohoto důvodu lze PF/DCD systém považovat za adhezivum s potenciálně příznivým chováním z hlediska retardace hoření, a to především díky dominanci procesů v kondenzované fázi, které vedou ke vzniku ochranné uhlíkaté vrstvy.

Celkově lze shrnout, že tepelný rozklad fenol-formaldehydové pryskyřice obohacené dicyandiamidem je výsledkem souběhu tří hlavních mechanismů:

- štěpení síťových vazeb fenol-formaldehydové matrice,
- kondenzačního a deaminačního rozkladu dicyandiamidu za vzniku dusíkatých heterocyklů,
- následné aromatizace a karbonizace vedoucí ke vzniku tepelně stabilního charu.

Právě tato kombinace vysvětluje zvýšenou tepelnou stabilitu systému, vyšší zbytkový podíl po zahřátí a jeho potenciální přínos pro zlepšení požárního chování lepených lignocelulózových materiálů.

4.1.4 Specifikace a charakteristika adhezivních systémů

Adhezivní systémy jsou klíčovou složkou aglomerovaných materiálů na bázi dřeva, neboť zajišťují přenos zatížení mezi lignocelulózovými prvky a definují celkovou integritu, pevnost a trvanlivost výsledného materiálu. Pro účely tohoto experimentu byla zvolena dvě technologicky odlišná pojiva představující odlišné přístupy k tvorbě strukturního spoje: jednosložkové polyuretanové lepidlo a fenol-formaldehydová pryskyřice.

4.1.4.1 KESTOPUR 1010 – Charakteristika lepidla

KESTOPUR 1010 představuje jednosložkové polyuretanové (PUR) lepidlo, jehož vytvrzování probíhá reakcí s vlhkostí. Je certifikováno dle požadavků normy EN 15425 a je schváleno pro výrobu produktů s označením CE. Specificky splňuje normy EN 14080 pro lepené lamelové dřevo a lepené masivní dřevo, EN 15497 pro konstrukční masivní dřevo s klínovým spojem (cink) a EN 16351 pro dřevěné konstrukce typu CLT, tedy křížem lepené dřevo. Může být rovněž aplikováno v dalších dřevěných výrobcích vyžadujících zvýšenou odolnost proti vlhkosti.

Mezi klíčové vlastnosti lepidla patří absence rozpouštědel a formaldehydu, což přispívá k jeho souladu s emisní třídou M1 pro stavební materiály. Lepidlo je dále vyztuženo vlákny a vykazuje nízké napěňování během vytvrzení.

Tabulka 2 Technické specifikace Kestopur 1010

Vlastnosti	Standard	Parametr
Báze	–	Polyuretan (PUR)
Obchodní název	–	Kestopur 1010
Výrobce	–	Kiilto Oy and Kiilto Family Oy, Finsko
Viskozita	ČSN EN 12092	~10 000 mPas; hodnota je závislá na teplotě, množství a podkladu
Skupenství	–	Kapalné
Barva	–	Bílá
Doporučený nános	–	140–180 g·m ⁻² pro cinkový spoj 160–200 g·m ⁻² pro plošný spoj
Hustota (při 23 °C / 65 % RH)	ČSN EN 542	1200 kg·m ⁻³
Max. tloušťka lepeného spoje	–	0,3 mm
Aplikační teplota prostředí	–	18–30 °C
Doba lisování	–	< 30 min
Vlhkost vzduchu	–	během lepení 40–75 % po lisování ≥ 30 %
Max. vlhkost dřeva	–	< 15 %
Otevřený čas	–	max. 10 minut při nánosu 180 g·m ⁻² , vlhkosti dřeva 15 % a teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50 %

4.1.4.2 Aplikace lepidla KESTOPUR a procesní parametry

Pro dosažení optimálních mechanických vlastností lepeného spoje je nezbytné dodržet technologické parametry stanovené výrobcem adheziva a příslušnými harmonizovanými normami ČSN EN. Přesná doba lisování a výsledná pevnost rozhraní se odvíjí od typu lepeného materiálu, vlhkosti dřeva, teploty prostředí, množství naneseného lepidla a tloušťky lepené spáry.

U systému KESTOPUR 1010 je nutné zohlednit mechanismus vytvrzování reakcí izokyanátových skupin s vlhkostí. Procesní parametry proto musí být nastaveny tak, aby byla zajištěna dostatečná dostupnost vlhkosti pro vytvrzení, ale současně aby nedošlo k nadměrnému pění, vzniku defektů ve spoji nebo snížení soudržnosti lepené spáry.

Limitujícími faktory prostředí jsou minimální aplikační teplota okolí 15 °C a teplota samotného adheziva v rozmezí 18–30 °C. Relativní vlhkost vzduchu během lepení musí dosahovat 40–75 %, zatímco po slisování je požadována hodnota alespoň 30 %. Vlhkost dřeva nesmí přesáhnout 15 % a vlhkostní gradient mezi jednotlivými lepenými prvky by měl být nižší než 5 %. Při standardním nánosu 180 g·m⁻², teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 % je maximální otevřený čas lepidla přibližně 10 minut.

Pro plošné lepení se doporučený nános adheziva pohybuje přibližně v rozmezí 160–200 g·m⁻². Rovnoměrnost nánosu je zásadní pro dosažení homogenního spoje, minimalizaci lokálních slabých míst a omezení rizika delaminace během mechanického i tepelného zatížení. Během konsolidace spoje musí adhezivum pod tlakem vykazovat kontinuální lepivost, což je vizuálně indikováno rovnoměrným vytlačáním přebytku lepidla po celé délce spáry.

Maximální přípustná tloušťka lepeného filmu činí 0,3 mm. Překročení této hodnoty může vyžadovat prodloužení lisovacího cyklu a současně zvyšuje riziko vzniku nehomogenní lepené linie. Vlastní doba lisování při plošné aplikaci obvykle přesahuje 30 minut a závisí na teplotně-vlhkostních poměrech, tloušťce lepeného souboru a konkrétní skladbě kompozitu.

Kvalitní adheze je podmíněna vhodnou přípravou substrátu. Lepené povrchy musí být čisté, bez prachu, mastnoty, volných částic a dalších nečistot, které by mohly negativně ovlivnit smáčení povrchu a penetraci adheziva. U nesavých materiálů nebo dřeva s vlhkostí pod 8 % se doporučuje povrchové navlhčení, případně mechanické zdrsnění. Vzhledem k povaze dýhových kompozitů je nezbytné kontrolovat také rovinnost a orientaci vláken jednotlivých vrstev, protože tyto parametry ovlivňují penetraci lepidla, tloušťku lepené spáry a výslednou mechanickou odezvu celého kompozitu.

Adhezivum se aplikuje rovnoměrně jednostranně nebo oboustranně za stálé fixace obou kontaktních ploch. Po nanesení lepidla musí následovat sestavení souboru a lisování v časovém intervalu odpovídajícím otevřenému času lepidla. Nedodržení tohoto intervalu může vést ke snížení kvality spoje, nedostatečnému smáčení povrchu nebo ke vzniku lokálních defektů.

Lepidlo musí být skladováno v originálních uzavřených obalech v suchém a chladném prostředí. Kontakt se vzdušnou vlhkostí může způsobit jeho předčasné vytvrzení.

4.1.4.3 Fenol-formaldehydové pryskyřice

Fenol-formaldehydové pryskyřice tvoří klíčovou skupinu termosetických lepidel pro velkoplošné materiály, zejména konstrukční překližky, dřevotřískové a vláknité desky určené pro exteriérové a vlhké prostředí. Jde o polykondenzační produkty fenolu a formaldehydu, nejčastěji ve formě zásaditě katalyzovaných resolových pryskyřic s přebytkem formaldehydu. Ty obsahují reaktivní methylolové skupiny, které při lisování kondenzují za vzniku prostorově zesíťované struktury.

System tvoří vodný roztok pryskyřice doplněný o plniva, reologické modifikátory a případné urychlovače či zpomalovače vytvrzování. Voda funguje jako hlavní ředidlo a viskozita je volena tak, aby lepidlo dostatečně penetrovalo do povrchových vrstev dřeva, ale současně nedocházelo k nadměrnému vsakování a oslabení lepené linie.

Vytvrzování probíhá v lisech při zvýšené teplotě, typicky 150–180 °C, a tlaku v řádu jednotek MPa. Během tohoto procesu se methylolové skupiny mění na methylenové a etherové můstky, uvolňuje se voda a zbytky formaldehydu a vzniká tvrdá, nerozpustná a netavitelná pryskyřice pevně spojující jednotlivé vrstvy. Doba zpracovatelnosti lepidla je omezena postupující kondenzací už při skladování, proto se směsi připravují v dávkách odpovídajících krátkodobé spotřebě a skladují se při nižších teplotách.

Vytvrzené spoje vykazují vysokou pevnost, rozměrovou stabilitu, velmi dobrou odolnost vůči vlhkosti, povětrnosti a mnoha chemikáliím a dobře snášejí i zvýšené teploty. Z těchto důvodů jsou fenol-formaldehydová lepidla standardem pro exteriérové a konstrukční deskové materiály.

Z hlediska manipulace se fenol-formaldehydová lepidla přepravují v uzavřených sudech nebo kontejnerech chráněných před přehřátím. Obvyklý doporučený skladovací rozsah je přibližně 5–25 °C, přičemž doba skladovatelnosti se pohybuje v řádu několika měsíců a je stanovena výrobcem. Při práci je nutné počítat s toxicitou fenolu a formaldehydu a s možnými emisemi formaldehydu při přípravě směsi a lisování. Proto se uplatňují systémy odsávání, větrání a osobní ochranné prostředky a moderní technologie směřují k minimalizaci emisí během výroby i používání lepených výrobků.

Tabulka 3 Technické specifikace Fenol-formaldehydové pryskyřice

Vlastnosti	Standard	Parametr
Báze	–	Termosetická fenol-formaldehydová pryskyřice
Obchodní název	–	Lignofen G/3/P
Výrobce	–	LERG S.A., Polsko
Viskozita	ČSN EN 12092	~10 000 mPas, hodnota je závislá na teplotě, množství a podkladu
Skupenství	–	vodný roztok pryskyřice
Barva	–	červená
Doporučený nános	udává výrobce	140–180 g·m ⁻² pro cinkový spoj 160–200 g·m ⁻² pro plošný spoj
Hustota (při 23 °C / 65 % RH)	ČSN EN 542	1200 kg·m ⁻³
Max. tloušťka lepeného spoje	–	0,3 mm
Aplikační teplota prostředí	udává výrobce	18–30 °C
Doba/ teplota lisování	–	< 30 min / 120°C
Vlhkost vzduchu	–	během lepení 40–75 % po lisování ≥ 30 %
Max. vlhkost dřeva	–	< 15 %
Otevřený čas	–	Max. 10 minut (při nánosu 180 g·m ⁻² , vlhkosti dřeva 15 %, teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50 %)
Plnivo na změnu viskozity	–	Doporučené dle výrobce nanášedky

4.1.4.4 Příprava lepicích směsí

V rámci experimentu byly použity tři varianty lepicích systémů, přičemž technologický postup výroby byl u jednotlivých variant sjednocen tak, aby bylo možné objektivně hodnotit vliv typu adheziva a jeho modifikace na výsledné vlastnosti překližky.

Základní variantou bylo fenol-formaldehydové lepidlo aplikované ve spojení se standardním průmyslovým plnivem běžně využívaným při výrobě stavebních překližek. Použitý lepicí systém a technologický postup vycházely z výrobní praxe společnosti Wotan Forest, a.s. Laboratorní zpracování bylo navrženo tak, aby co nejvěrněji simulovalo průmyslové podmínky.

Alternativní variantou bylo fenol-formaldehydové lepidlo, u něhož bylo standardní plnivo zcela nahrazeno dicyandiamidem (C₂H₄N₄). Fenol-formaldehydová pryskyřice byla v obou případech nejprve částečně naředěna vodou za účelem úpravy reologických vlastností. Následně bylo v definovaném hmotnostním poměru přidáno plnivo, respektive dicyandiamid.

Úlohou této složky bylo dosažení požadované viskozity adheziva vhodné pro aplikaci na dřevní dýhy a současně modifikace vlastností lepicí spáry. Dicyandiamid byl zvolen

s ohledem na jeho schopnost zvyšovat tepelnou stabilitu polymerních systémů a na předpokládané zlepšení chování lepeného spoje při působení vysokých teplot.

Připravená lepidla byla intenzivně homogenizována mechanickým míchadlem typu HS-100D (Witeg Labortechnik GmbH, Německo) po dobu 30 minut tak, aby byla zajištěna rovnoměrná distribuce jednotlivých složek. Konzistence lepidel byla ověřena laboratorním stanovením viskozity pomocí Fordova výtokového kelímku, který slouží k orientačnímu určení kinematické viskozity kapalin na základě doby výtoku definovaného objemu.

Po ověření požadovaných parametrů byla adheziva nanášena ručně pomocí štětce na obě styčné plochy dýh, které byly následně skládány do předem definovaných sestav.

4.2 Příprava zkušebních vzorků

Příprava zkušebních vzorků zahrnovala sestavení kompozitních panelů z devíti vrstev smrkových dýh, přičemž každá dýha měla tloušťku 2 mm. Orientace vláken byla střídavě nastavena podél delší a kratší strany, aby byla zajištěna ortogonální struktura jednotlivých vrstev. Cílová tloušťka každé překližky byla stanovena na 18 mm.

Celkem bylo připraveno 20 zkušebních sestav, přičemž pro každou z deseti materiálových variant byly vytvořeny dvě identické sestavy označené písmeny A a B. Předpokládala se ochrana proti šíření požáru pouze z jedné strany. V případě požadavku na oboustranně chráněný materiál by bylo nutné jednotlivé varianty uspořádat zrcadlově směrem ke středu překližky.

Jednotlivé varianty byly kódovány čísly 1 až 10 a písmeny A a B. Varianta A byla určena pro zkoušky na kónickém kalorimetru, stanovení kouřivosti, toxicity zplodin hoření, spalného tepla a další souvisejí zkoušky. Varianta B byla určena pro zkoušky šíření plamene po svislých zkušebních tělesech a pro termogravimetrickou analýzu (TGA).

Desátá varianta sloužila jako referenční vzorek a byla sestavena výhradně z neupravených dýh a standardního fenol-formaldehydového lepidla běžně používaného ve výrobě společností Wotan Forest, a.s. Zbývajících devět variant bylo modifikováno různými způsoby, přičemž retardéry hoření byly implementovány buď do lepených spár, nebo aplikovány tlakovou impregnací přímo na jednotlivé dýhové vrstvy.

4.2.1 Typy variant zkušebních vzorků

Varianta 1 A/B: První čtyři dýhové vrstvy byly postupně impregnovány bezvodým síranem sodným (Na_2SO_4), octanem draselným (CH_3COOK), černým louhem (Mondi Štětí, a.s.) a dihydrogenfosforečnanem amonným ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$). Zbývající dýhy byly ponechány bez úpravy. Všechny lepené spáry byly vytvořeny pomocí standardního fenol-formaldehydového lepidla.

Varianta 2 A/B: Dýhové vrstvy 1 až 4 byly postupně impregnovány dihydrogenfosforečnanem amonným ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), černým louhem (Mondi Štětí, a.s.), octanem draselným (CH_3COOK) a bezvodým síranem sodným (Na_2SO_4). Ostatní dýhy nebyly ošetřeny. Jako pojivo bylo použito fenol-formaldehydové lepidlo.

Varianta 3 A/B: První čtyři dýhové vrstvy byly postupně impregnovány dihydrogenfosforečnanem amonným ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), octanem draselným (CH_3COOK), bezvodým síranem sodným (Na_2SO_4) a černým louhem (Mondi Štětí, a.s.). Ostatní dýhy nebyly ošetřeny. Všechny lepené spáry byly vytvořeny fenol-formaldehydovým lepidlem.

Varianta 4 A/B: Dýhové vrstvy 1 až 5 byly impregnovány černým louhem (Mondi Štětí, a.s.). Zbývající dýhy nebyly ošetřeny. Ve všech lepených spárách bylo použito fenol-formaldehydové lepidlo.

Varianta 5 A/B: Dýhové vrstvy 1 až 5 byly impregnovány dihydrogenfosforečnanem amonným ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$). Zbývající dýhy nebyly ošetřeny. Všechny lepené spáry byly vytvořeny fenol-formaldehydovým lepidlem s příměsí dicyandiamidu ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$).

Varianta 6 A/B: Dýhové vrstvy 1 až 6 byly impregnovány střídavě dihydrogenfosforečnanem amonným ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) a octanem draselným (CH_3COOK). Zbývající dýhy nebyly ošetřeny. Lepené spáry 1 až 3 byly vytvořeny fenol-formaldehydovým lepidlem s příměsí dicyandiamidu ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$), zatímco ve zbývajících lepených spárách bylo použito standardní fenol-formaldehydové lepidlo.

Varianta 7 A/B: První dýha byla ponechána bez impregnace. Dýhové vrstvy 2 až 8 byly impregnovány černým louhem (Mondi Štětí, a.s.), zatímco poslední dýha nebyla ošetřena. Ve všech lepených spárách bylo použito fenol-formaldehydové lepidlo.

Varianta 8 A/B: Všechny dýhové vrstvy byly ponechány bez impregnace. Pro všechny lepené spáry bylo použito jednosložkové polyuretanové lepidlo KESTOPUR 1010.

Varianta 9 A/B: Všechny dýhové vrstvy byly ponechány bez impregnace. Pro všechny lepené spáry bylo použito fenol-formaldehydové lepidlo s příměsí dicyandiamidu ($C_2H_4N_4$).

Varianta 10 A/B: Referenční varianta byla sestavena z neupravených dýh. Všechny lepené spáry byly vytvořeny standardním fenol-formaldehydovým lepidlem bez přidavku dicyandiamidu a bez aplikace impregnačních retardérů hoření.



	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B Ref
Vrstva1	Na ₂ SO ₄	NH ₄ H ₂ PO ₄	NH ₄ H ₂ PO ₄	černý louh	NH ₄ H ₂ PO ₄	NH ₄ H ₂ PO ₄				
Lepidlo	PF	PF	PF	PF	PF + DCD	PF + DCD	PF	PUR 1010	PF + DCD	PF
Vrstva2	CH ₃ COOK	černý louh	CH ₃ COOK	černý louh	NH ₄ H ₂ PO ₄	CH ₃ COOK	černý louh			
Lepidlo	PF	PF	PF	PF	PF + DCD	PF + DCD	PF	PUR 1010	PF + DCD	PF
Vrstva3	černý louh	CH ₃ COOK	Na ₂ SO ₄	černý louh	NH ₄ H ₂ PO ₄	NH ₄ H ₂ PO ₄	černý louh			
Lepidlo	PF	PF	PF	PF	PF + DCD	PF + DCD	PF	PUR 1010	PF + DCD	PF
Vrstva4	NH ₄ H ₂ PO ₄	Na ₂ SO ₄	černý louh	černý louh	NH ₄ H ₂ PO ₄	CH ₃ COOK	černý louh			
Lepidlo	PF	PF	PF	PF	PF + DCD	PF	PF	PUR 1010	PF + DCD	PF
Vrstva5		černý louh		černý louh	NH ₄ H ₂ PO ₄	NH ₄ H ₂ PO ₄	černý louh			
Lepidlo	PF	PF	PF	PF	PF + DCD	PF	PF	PUR 1010	PF + DCD	PF
Vrstva6						CH ₃ COOK	černý louh			
Lepidlo	PF	PF	PF	PF	PF + DCD	PF	PF	PUR 1010	PF + DCD	PF
Vrstva7							černý louh			
Lepidlo	PF	PF	PF	PF	PF + DCD	PF	PF	PUR 1010	PF + DCD	PF
Vrstva8							černý louh			
Lepidlo	PF	PF	PF	PF	PF + DCD	PF	PF	PUR 1010	PF + DCD	PF
Vrstva9										

Obr. 2 Schéma rozdělení a umístění použitých lepidel a impregnačních látek v jednotlivých vrstvách překližky.

4.2.2 Metodický přístup k výrobě zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vyrobena z loupaných dýh odebraných přímo z výrobní linky společnosti Wotan Forest, a.s., kde se standardně používají pro výrobu stavebních překližek. Dýhy byly řazeny do kvalitativní třídy A a B. Odběr dýh probíhal ve skladu dýhového sortimentu určeného k následnému lepení a lisování.

Ve výrobě jsou běžně používány loupané dýhy ve formátu 2,0×1,5 m. Z důvodu nutnosti převozu a manipulace byly v provozu následně naformátovány na formátovacím centru na rozměry 1,0×0,2 m.

Dýhy byly připraveny ve dvou typech sestavách:

- sestava s orientací vláken podél delší strany dýhy,
- sestava s orientací vláken kolmo k delší straně dýhy.

Tento postup byl zvolen s ohledem na konstrukční princip překližovaných materiálů, u nichž se jednotlivé vrstvy skládají s kolmo orientovanými vlákny. Tím dochází ke snížení materiálové heterogenity ve srovnání s masivním dřevem a ke zvýšení rozměrové stability výsledného materiálu.

Nařezané dýhy byly následně transportovány na Fakultu lesnickou a dřevařskou, kde byly v truhlářské dílně dále tříděny podle kvality a sestaveny do jednotlivých skladbových sestav. Cílová tloušťka výsledné překližky byla stanovena na 18 mm, což odpovídá skladbě z devíti vrstev dýh. Pro každý zkušební vzorek byly připraveny dvě identické sestavy, označené jako sestava A a sestava B.

Sestava A byla určena pro zkoušky na kónickém kalorimetru, stanovení kouřivosti, spalného tepla a další související zkoušky. Sestava B byla určena pro zkoušky šíření plamene po svislých zkušebních tělesech a pro termogravimetrickou analýzu. Celkem bylo připraveno 20 sestav odpovídajících 10 variantám materiálového řešení.

Při výběru dýh byl kladen důraz na eliminaci přirozených vad dřeva, které by mohly ovlivnit výsledky zkoušek. Zpracovány nebyly dýhy s prasklinami, výrazně nadměrnými suky, zvlněním vláken nebo jinými defekty. Zároveň bylo dbáno na to, aby jednotlivé vrstvy ve všech variantách vykazovaly srovnatelnou kvalitu. Takto připravené sestavy byly zajištěny papírovou páskou, jednoznačně označeny a převezeny do laboratoře.



Obr. 3 Formátovací centrum, na kterém byly připravovány jednotlivé sestavy zkušebních těles.

4.2.3 Tlaková impregnace dýh

Z jednotlivých sestav byly následně vyjmuty dýhy určené k impregnaci stejným typem retardéru hoření. Tyto dýhy, bez ohledu na orientaci vláken, tedy podélnou nebo příčnou, byly seskupeny do impregnačních paketů podle druhu použité impregnační látky.

Impregnace byla provedena pomocí vysokotlakého autoklávu typu VTIZ (VYVOS spol. s r.o., Česká republika). Pro každý zpomalovač hoření byl připraven impregnační roztok o definované koncentraci, který byl nalit do impregnačního koryta. Dýhy byly zatíženy tak, aby byly po celou dobu procesu zcela ponořeny pod hladinou roztoku, a následně byla impregnační komora uzavřena.

První fáze impregnace probíhala po dobu 30 minut při podtlaku 0,8 bar. Následně byl pomocí stlačeného vzduchu aplikován tlak 7 bar po dobu 60 minut. Po ukončení tlakové fáze byl tlak vyrovnán s okolním prostředím a komora byla otevřena.



Obr. 5 Impregnační koryto s nalitým impregnačním roztokem, ve kterém jsou ponořené a zatížené dýhy během řízeného procesu penetrační impregnace.



Obr. 4 Impregnační komora VYVOS s napojením na externí kompresor pro tlakový impregnační proces.

Dýhy byly vyjmuty z impregnačního roztoku, ponechány po dobu 60 minut k volnému okapání a následně sušeny v horkovzdušné sušárně při teplotě 70 °C po dobu 6 hodin. Tímto postupem byly realizovány všechny impregnační varianty. Po vysušení byly jednotlivé dýhy vráceny zpět do původních sestav na přesně definované pozice podle skladby a typu použitého retardéru.

Takto připravené sestavy byly ponechány v laboratorních podmínkách ke klimatizaci až do dosažení rovnovážné vlhkosti. Neupravené referenční dýhy dosáhly konečné vlhkosti $12 \pm 1 \%$.

4.2.4 Lepení, lisování a klimatizace zkušebních sestav

Takto připravené a klimatizované sestavy byly následně slepeny a slisovány. V rámci experimentu byly použity tři varianty lepicích systémů: standardní fenol-formaldehydové lepidlo s průmyslovým plnivem, fenol-formaldehydové lepidlo s přídavkem dicyandiamidu a jednosložkové polyuretanové lepidlo KESTOPUR 1010.



Obr. 7 Testování parametrů připraveného adheziva, konkrétně teploty a viskozity, pomocí Fordova kelímku.



Obr. 6 Homogenizace lepicí směsi pomocí laboratorního míchadla s vrtulkovým nástavcem.

Příprava fenol-formaldehydových směsí byla provedena podle postupu popsáného v kapitole 4.1.4.4. Lepicí systémy byly připraveny tak, aby bylo možné porovnat vliv standardního plniva, náhrady plniva dicyandiamidem a použití polyuretanového lepidla na výsledné vlastnosti materiálu.

Připravená lepidla byla intenzivně homogenizována mícháním mechanických míchadlem typu HS-100D (Witeg Labortechnik GmbH, Germani) po dobu 30 minut (Obrázek 6, 7) tak, aby byla zajištěna rovnoměrná distribuce jednotlivých složek. Konzistence lepidel byla ověřena laboratorním stanovením viskozity pomocí Fordova výtokového kelímku, který slouží k orientačnímu určení kinematické viskozity kapalin na základě doby výtoku definovaného objemu.

Po ověření požadovaných parametrů byla adheziva nanášena ručně pomocí štětce na obě styčné plochy dýh, které byly následně skládány do předem definovaných sestav. Po nanesení lepidla byla skladba ponechána volně, bez přítlaku, po dobu 20 minut v laboratorních podmínkách při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 %. V této fázi docházelo k částečnému zavadnutí lepidla, tedy k využití otevřeného času nezbytného pro stabilizaci lepicí spáry před vlastním lisováním.

Lisování fenol-formaldehydových variant probíhalo v hydraulickém lisu s oboustranně vyhřívanými lisovacími deskami. Teplota lisovacích desek byla nastavena na 125 °C a lisovací tlak byl nastaven na 1,5 MPa tak, aby uvedené parametry co nejvěrněji simulovaly proces lisování na výrobní lince společnosti Wotan Forest, a.s.

Doba lisování byla stanovena s ohledem na výslednou tloušťku překližky 18 mm a tepelnou vodivost materiálu. Při oboustranném vyhřívání činila doba lisování 20 minut. To zajistilo dostatečný prostup aktivační teploty do všech lepených spár a úplnou polymeraci fenol-formaldehydové pryskyřice.

Jako třetí varianta byla připravena sestava dýh lepená jednosložkovým polyuretanovým lepidlem KESTOPUR 1010. V tomto případě probíhalo lisování za studena při teplotě lisovacích desek 20 °C. Sestava byla zalisována v hydraulickém lisu po dobu 3 hodin, což umožnilo úplný průběh vytvrzovací reakce polyuretanového lepidla a vznik soudržné lepicí spáry.

Po ukončení lisovacího cyklu byly desky vyjmuty z lisu a umístěny do kondenzačního stojanu, kde bylo zajištěno rovnoměrné proudění vzduchu z obou stran. Tento krok umožnil pozvolné a symetrické ochlazování materiálu a minimalizoval vznik vnitřních napětí, která by mohla vést k deformacím nebo tvarové nestabilitě překližky.

Po dosažení laboratorní teploty v celém průřezu byly desky umístěny do klimatizační komory. Klimatizace probíhala při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %, což odpovídá rovnovážné vlhkosti dřeva přibližně 12 %. Proces klimatizace trval až do ustálení hmotnosti vzorků, tedy do dosažení rovnovážného vlhkostního stavu a eliminace vlhkostního gradientu v celém průřezu desek.

4.3 Hodnocení vlastností vyvíjených materiálů

Tato kapitola popisuje metody a přístrojové vybavení použité pro hodnocení vlastností vyvíjených překližovaných aglomerovaných materiálů na bázi dřeva. Zvolené zkoušky byly

zaměřeny především na požární chování, tvorbu kouře, šíření plamene, tepelnou odezvu v tloušťce materiálu a zachování mechanických vlastností po požární expozici.

Hodnocení bylo navrženo tak, aby umožnilo porovnat jednotlivé materiálové varianty nejen podle intenzity hoření, ale také podle schopnosti omezit šíření plamene a zachovat vnitřní soudržnost po tepelném namáhání.

Získaná data byla následně použita pro vzájemné porovnání jednotlivých variant a pro posouzení vlivu použitých zpomalovačů hoření a lepicích systémů na výsledné požárně-technické a mechanické vlastnosti materiálu.

4.3.1 Zkouška vývoje dýmu dle ČSN EN ISO 5659-2

Hodnocení kouřivosti zkušebních těles bylo provedeno metodou jednokomorové zkoušky podle normy ČSN EN ISO 5659-2, která slouží ke kvantifikaci produkce kouře vznikajícího při tepelném namáhání materiálů za přesně definovaných podmínek. Metoda je aplikovatelná na materiály, výrobky i kompozitní systémy s převážně rovinným povrchem a umožňuje sledovat dynamiku tvorby kouře v uzavřeném prostoru při působení sálavého tepelného toku.

Princip zkoušky spočívá v horizontálním umístění zkušební vzorku do uzavřené testovací komory vybavené optickým měřicím systémem. Povrch vzorku je vystaven účinku kónického zářiče generujícího definovaný tepelný tok, nejčastěji $25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ nebo $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, přičemž v některých expozičních režimech může být aplikován také zapalovací plamen. V průběhu tepelného rozkladu a případného hoření se uvolňují produkty spalování a pyrolýzy, které se akumulují v prostoru komory a způsobují zeslabení intenzity světelného paprsku procházejícího definovanou optickou drahou.

Zkušební tělesa byla připravena ve tvaru čtverců o rozměrech $75 \times 75 \text{ mm}$ v reprezentativní tloušťce odpovídající reálnému použití materiálu. Před měřením byly vzorky klimatizovány do ustálené hmotnosti při teplotě $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti $50 \pm 5 \%$, čímž byla zajištěna reprodukovatelnost výsledků a minimalizován vliv vlhkostního stavu materiálu na průběh termického rozkladu.

Základní měřenou veličinou je optická hustota kouře D , která vyjadřuje stupeň zeslabení světelného toku v důsledku přítomnosti kouřových částic v komoře. Je definována jako negativní dekadický logaritmus poměru aktuální a počáteční intenzity světla:

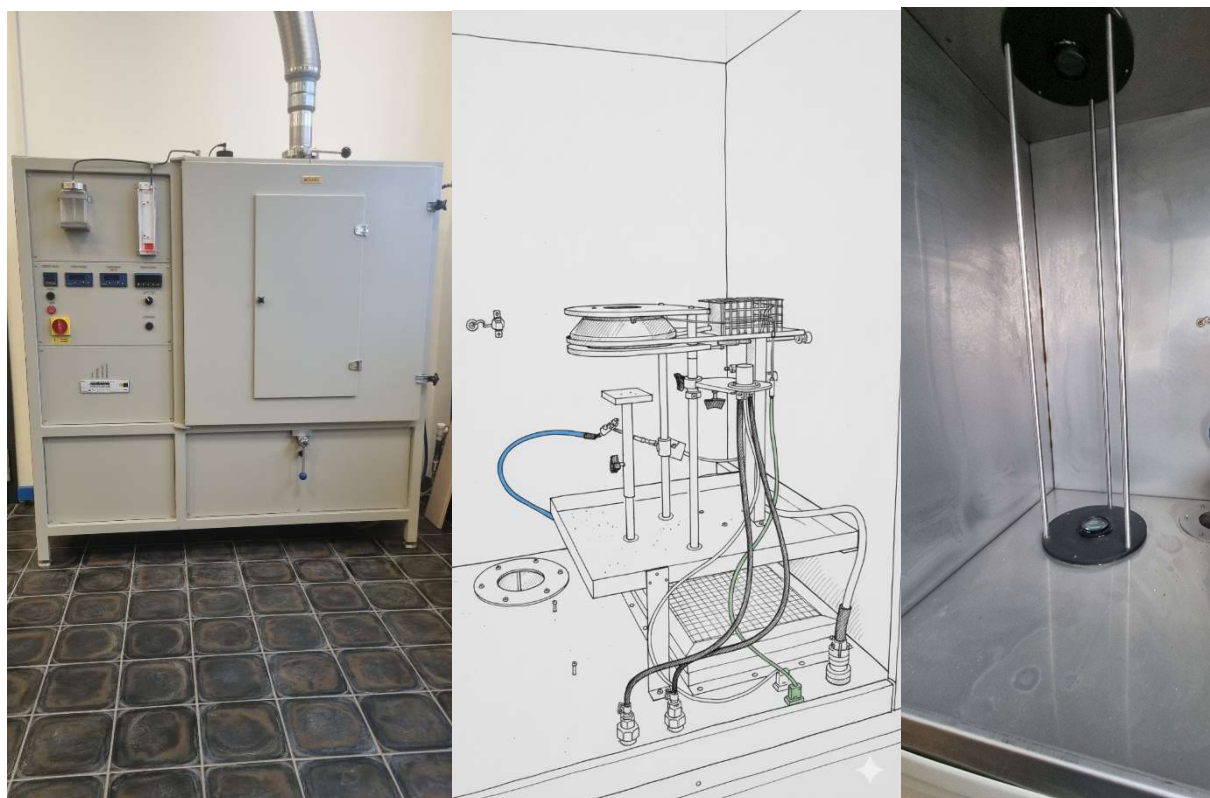
$$D = -\log_{10} \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \quad (6)$$

kde I_t je intenzita světla zaznamenaná v čase t během zkoušky a I_0 je referenční intenzita světla v čistém prostředí bez kouře.

Pro normalizaci výsledků na geometrii zařízení a rozměry zkušebního tělesa se používá specifická optická hustota kouře D_s , která je definována vztahem:

$$D_s = D \cdot \frac{V}{A \cdot L} \quad (7)$$

kde V je objem testovací komory (m^3), A exponovaná plocha vzorku (m^2) a L délka optické dráhy (m).



Obr. 8 Komora na testování vývoje kouře, držák vzorku v komoře, světelný kužel.

Tato veličina umožňuje objektivní porovnání kouřivosti různých materiálů a je standardně používána při hodnocení požárně-technických vlastností konstrukčních výrobků. Během zkoušky je zaznamenáván časový průběh $D_s(t)$, z něhož jsou odvozovány klíčové charakteristiky, zejména maximální hodnota specifické optické hustoty $D_{s,\max}$ a hodnoty D_s v definovaných časových okamžicích, například po 1, 4 nebo 10 minutách expozice.

Optická hustota kouře přímo souvisí se ztrátou viditelnosti v zakouřeném prostoru. Se zvyšující se hodnotou D_s dochází k exponenciálnímu poklesu vizuálního dosahu, což vede k dezorientaci osob a významnému zpomalení evakuace. Z tohoto důvodu jsou parametry D_s a VOF běžně využívány v klasifikačních systémech požární bezpečnosti konstrukčních materiálů.

V aplikační praxi se jako kritické hodnoty často používají limity specifické optické hustoty v prvních minutách expozice, které reprezentují nejnebezpečnější fázi rozvoje požáru. Přísnější požární požadavky obvykle vyžadují nižší maximální hodnoty D_s i nižší kumulativní kouřivost vyjádřenou parametrem VOF .

Před každou zkušební sérií byla provedena kalibrace optického měřicího systému a nastavení referenčních hodnot pro čisté prostředí bez kouře. Současně byl pomocí externího senzoru ověřen tepelný tok kónického zářiče. Ve všech experimentech této studie byl použit expoziční režim $25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

4.3.2 Stanovení laterálního šíření plamene po svislých prvcích dle ISO 5658-2

Šíření plamene po svislých zkušebních tělesech bylo hodnoceno metodou radiačního panelu dle ISO 5658-2. Tato metoda slouží ke stanovení laterálního postupu čela plamene po povrchu stavebních výrobků ve svislé poloze při působení definovaného gradientu sálavého tepelného toku.

Zkušební těleso bylo umístěno svisle do kovového držáku tak, aby exponovaná plocha měla rozměr $160 \times 800 \text{ mm}$. Součástí montáže byla nehořlavá podkladní deska a podle potřeby také distanční prvky pro vytvoření vzduchové mezery. Tím byly sjednoceny okrajové podmínky přenosu tepla a omezeny nežádoucí deformace vzorku.

Po instalaci vůči radiačnímu panelu byl vzorek zapálen pilotním plamenem v dolní části expozice. Postup čela plamene byl sledován pomocí referenčního měřicího rastru a vizuálního odečtu časů, ve kterých plamen dosáhl definovaných vzdáleností.

Před měřením byl radiační panel kalibrován tak, aby vytvářel předepsaný profil tepelného toku podél délky vzorku. Kalibrace byla provedena pomocí kalibrační desky a externího čidla tepelného toku. Z naměřených hodnot byl ověřen kalibrační profil $q''(x)$. Tento profil je důležitý pro následné stanovení kritického tepelného toku pro udržení hoření (CHF), tedy hodnoty tepelného toku v místě, kde se šíření plamene zastaví.

Primárními výstupy zkoušky byly časové údaje postupu čela plamene do definovaných vzdáleností, rychlost šíření plamene a hodnota *CHF*. Metoda tak umožnila posoudit, zda použitá úprava omezuje šíření požáru po povrchu svislého dílce.



Obr. 9 Zařízení dle ISO 5658-2



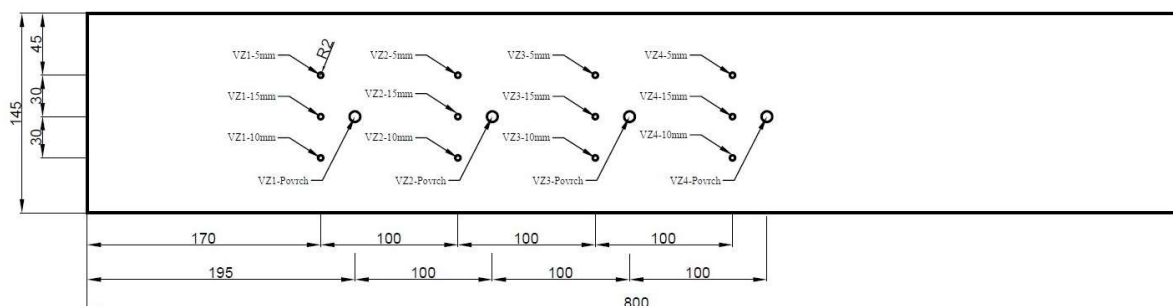
Obr. 10 Vývoj plamene při testu

4.3.2.1 Instrumentovaná modifikace zkoušky šíření plamene dle ISO 5658-2

Zkouška laterálního šíření plamene po svislých zkušebních tělesech dle ISO 5658-2 byla rozšířena o detailní měření teplotního pole v tloušťce materiálu pomocí termočlánků typu K. Cílem této modifikace bylo kvantifikovat tepelnou penetraci do průřezu překližovaného materiálu v závislosti na lokálním sálavém tepelném toku a postupu čela plamene po exponovaném povrchu.

Termočlánky typu K byly zvoleny s ohledem na jejich teplotní stabilitu a vhodnost pro požárně-technická měření. Čidla byla instalována ze zadní strany zkušebního tělesa do předvrtaných otvorů kolmo k exponované ploše.

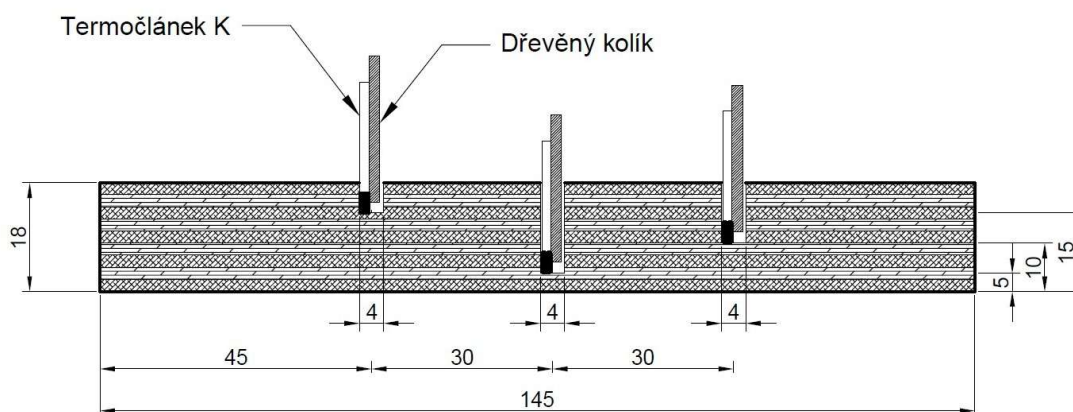
Měřicí systém byl uspořádán do čtyř podélných měřicích řad rozmístěných ve směru klesajícího tepelného toku radiačního panelu. První řada byla umístěna v oblasti nejvyššího sálavého zatížení a každá další řada byla vzdálena o 100 mm směrem od zdroje tepla.



Obr. 11 Rozmístění termočlánku typu K po ploše testovaného vzorku.

V každé řadě byly instalovány tři termočlánky typu K (obrázek 11,12) (Ahlborn, měřicí a regulační technika, spol. s r.o., Česká republika) v hloubkách:

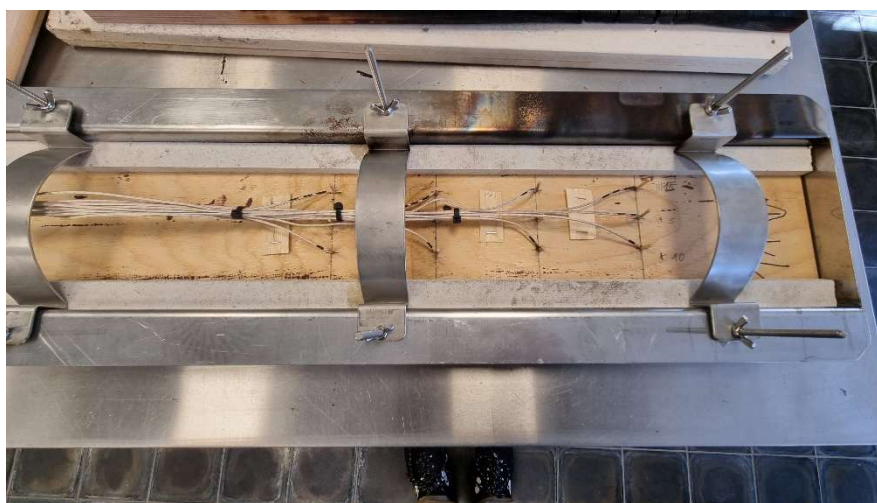
- 5 mm pod exponovaným povrchem,
- 10 mm v mezivrstvě překližky,
- 15 mm v blízkosti zadní plochy zkušebního tělesa.



Obr. 12 Umístění termočlánku typu K v průřezu testovaného vzorku.

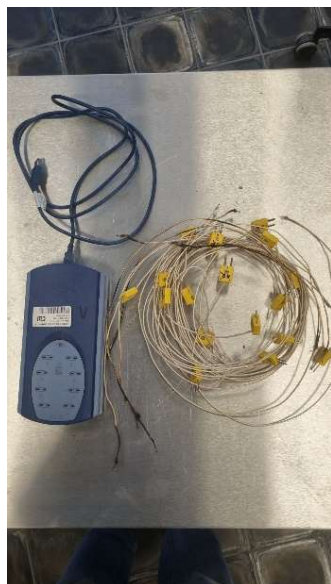
Pro sledování teploty na zadním povrchu byl v každé měřicí pozici umístěn také povrchový termočlánek přiložený k zadní straně vzorku. Termočlánek byl překryt tenkou dýhou fixovanou kovovými sponkami, aby byl omezen vliv okolního proudění vzduchu.

Všechna teplotní čidla byla připojena ke dvěma sběrným datovým modulům propojeným s řídicím počítačem přes rozhraní USB. Teplotní signál byl zaznamenáván v časovém kroku 5 sekund po celou dobu zkoušky.

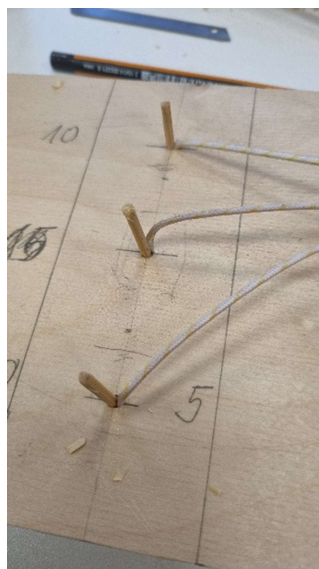


Obr. 13 Uchycení vzorku v držáku a jeho fixace se zabezpečením termočlánků.

Tato úprava umožnila propojit tři typy informací: lokální tepelný tok radičního panelu, postup čela plamene po povrchu a teplotní profil v tloušťce materiálu. Na rozdíl od standardního normového hodnocení tak bylo možné sledovat také rychlost tepelné penetrace do jednotlivých vrstev překližky.



Obr. 15 Termočlánky a sběrnice dat.



Obr. 16 Fixace termočlánků



Obr. 14 Upevnění v přístroji

4.3.3 Kónická kalorimetrie dle ISO 5660-1

Požární odezva zkušebních těles byla hodnocena metodou kónického kalorimetru v souladu s normou ISO 5660-1, která umožňuje současné stanovení rychlosti uvolňování tepla, a hmotnostního úbytku materiálu při kontrolovaném tepelném zatížení. Metoda je založena na principu kalorimetrie spotřeby kyslíku, podle něhož je množství uvolněné energie během hoření přímo úměrné množství spotřebovaného kyslíku ve spalínách.

Zkušební tělesa byla připravena ve formě čtvercových vzorků o rozměrech 100×100 mm v reprezentativní tloušťce materiálu. Vzorky byly umístěny do kovového držáku, který zajišťoval stabilní polohu vzorku během expozice a současně minimalizoval boční únik tepla. Držák byl vyplněn tepelně izolačním materiálem, konkrétně refrakterní vláknitou deskou tak, aby bylo dosaženo jednosměrného přenosu tepla do vzorku a aby degradace materiálu probíhala převážně z exponovaného povrchu. Povrch vzorku byl orientován horizontálně směrem k zářiči ve standardní vzdálenosti odpovídající kalibrační poloze zařízení.

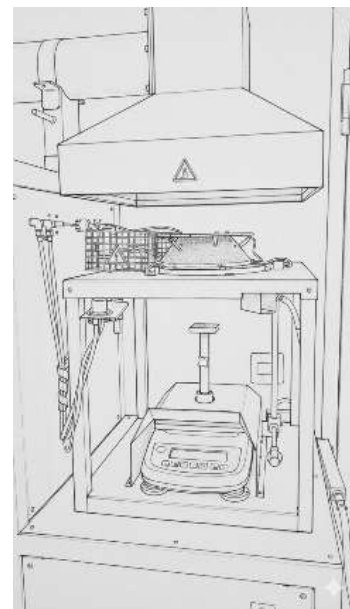
Tepelné zatížení bylo generováno kónickým elektrickým zářičem s regulovaným výkonem, který vytvářel rovnoměrný tok sálavého tepla na exponovanou plochu vzorku. V této studii byl použit expoziční režim odpovídající tepelnému toku $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, který simuluje podmínky plně rozvinutého požáru v uzavřeném prostoru. Zapálení materiálu bylo iniciováno zapalovací elektrodou umístěnou nad povrchem vzorku.



Obr. 19 Kónická kalorimetrie dle ISO 5660-1



Obr. 17 Držák vzorků



Obr. 18 Schéma měřicího prostoru

Spaliny vznikající během tepelného rozkladu a hoření byly kontinuálně odváděny odsávacím systémem do analyzační jednotky. V analyzačním potrubí byly instalovány senzory pro měření koncentrace kyslíku, oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého. Současně byl zaznamenáván objemový průtok spalin a jejich teplota, což umožňovalo přesný výpočet energetických parametrů.

Hmotnostní změny vzorku byly měřeny pomocí integrovaného vážicího zařízení s vysokým rozlišením, umístěného pod držákem vzorku, které umožňovalo kontinuální záznam úbytku hmotnosti v průběhu experimentu.

Rychlost uvolňování tepla $HRR(t)$ byla stanovena na základě spotřeby kyslíku podle vztahu:

$$HRR(t) = E \cdot \dot{m}_{O_2}(t) \quad (8)$$

kde E je energetický ekvivalent spotřeby kyslíku, přibližně $13,1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ O}_2$, a $\dot{m}_{O_2}(t)$ je hmotnostní tok spotřebovaného kyslíku ve spalinách.

Z časového průběhu HRR byly odvozeny charakteristické parametry, zejména maximální rychlost uvolňování tepla HRR_{max} a celkové uvolněné teplo THR :

$$THR = \int_0^t HRR(\tau) d\tau \quad (9)$$

Rychlost hmotnostního úbytku materiálu byla stanovena diferenciací hmotnosti v čase:

$$MLR(t) = -\frac{dm}{dt} \quad (10)$$

Efektivní spalné teplo EHC bylo následně vypočteno jako poměr uvolněného tepla k hmotnostnímu úbytku materiálu:

$$EHC = \frac{HRR}{MLR} \quad (11)$$

Parametr $ARHE$ (*Average Rate of Heat Emission*) představuje kumulativní časový průměr rychlosti uvolňování tepla od okamžiku iniciace (t_{ig}). Jeho primární funkcí je eliminace stochastických fluktuací v záznamu okamžitého HRR , například vlivem praskání karbonizované vrstvy, čímž poskytuje objektivnější obraz o energetickém potenciálu rozvoje požáru. Matematicky je hodnota $ARHE$ v čase t definována vztahem:

$$ARHE(t) = \frac{\int_{t_{ig}}^t \ddot{q}(t) dt}{t - t_{ig}} \quad (12)$$

kde $\ddot{q}(t)$ je okamžitá rychlost uvolňování tepla na jednotku plochy, tedy HRR [$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$], t je celkový čas od začátku expozice [s] a t_{ig} je čas do zapálení vzorku (*time to ignition*) [s].

Před zahájením každé měřicí série byla provedena komplexní kalibrace systému zahrnující nastavení intenzity tepelného toku kónického zářiče pomocí referenčního senzoru tepelného toku umístěného v rovině exponovaného povrchu vzorku, kalibraci analyzátoru kyslíku pomocí standardizovaných plyných směsí a ověření průtokových charakteristik odsávacího systému. Současně byla kontrolována přesnost vážicího systému.

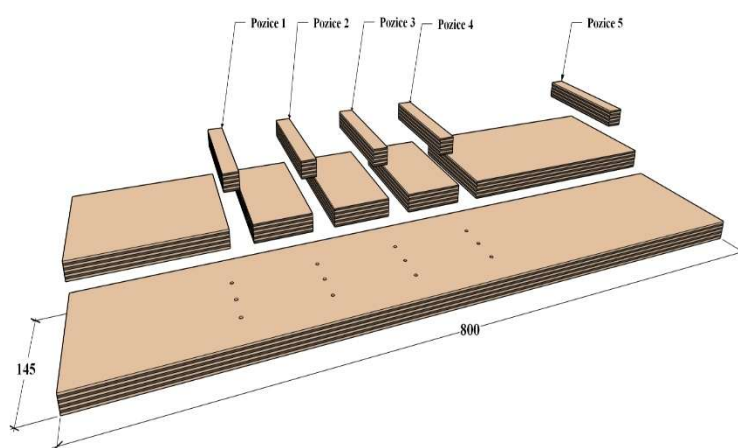
Tato opatření zajistila správnost výpočtu energetických parametrů a vysokou reprodukovatelnost experimentálních výsledků.

4.3.4 Testování mechanických vlastností

Měření mechanických vlastností v závislosti na míře ohoření bylo realizováno na zkušebních tělesech odvozených z panelů, které byly předem vystaveny zkoušce svislého šíření plamene dle ČSN EN ISO 5658-2. Po ukončení požární zkoušky byly panely ponechány volně vychladnout na laboratorní teplotu, aby nedocházelo k dodatečným teplotně indukovaným změnám struktury.



Obr. 21 Jednotlivé části tělesa.



Obr. 20 Metoda vymanipulování zkušebních těles ze vzorků.

Následně z nich byly systematicky odebrány vzorky z pěti definovaných pozic podél směru šíření tepelné fronty v návaznosti na umístění teplotních čidel. První sada vzorků byla odebrána bezprostředně za pozicí teplotních čidel (pozice 1), tedy z oblasti reprezentující nejintenzivnější teplotní expozici v měřicí zóně (obrázek 20, 21). Další vzorky následovaly za pozicemi čidel 2, 3 a 4. Pátý vzorek pocházel z oblasti tělesa, která nebyla zatížena tepelným tokem zářiče ani šířením požáru po povrchu panelu, a je proto uvažován jako referenční těleso daného panelu. Jeho mechanické vlastnosti reprezentují stav nepoškozeného materiálu.

Z každé pozice byly odřezány zkušební tělesa o rozměrech 20×145 mm z nejvzdálenější možné části od sálavého panelu, tj. z oblasti, jejíž případná degradace je dána primárně průchodem tepelné fronty. Tímto postupem byla zachována jednoznačná vazba mezi konkrétní pozicí vzorku, průběhem teplotní expozice a výsledným stupněm ohoření.

Připravené vzorky byly následně popsány a anonymizovány z hlediska polohy i varianty povrchového ošetření. Poté byly umístěny do klimatizační komory za účelem stabilizace vlhkostně–teplotního stavu dle standardních podmínek pro materiálové zkoušky dřeva a desek. Tento krok minimalizuje vliv rozdílného obsahu vlhkosti a teploty na naměřené mechanické charakteristiky a zvýšil reprodukovatelnost experimentu.

4.3.4.1 Tříbodový ohyb a optická korelace deformací

Vlastní mechanické testování bylo realizováno v režimu tříbodového ohybu s využitím univerzálního zkušebního stroje TIRA Test 2850 (TIRA GmbH, Německo) v kombinaci s bezkontaktním optickým korelačním systémem ARAMIS. Vzdálenost spodních podpěr byla stanovena na 120 mm, přičemž zatěžovací hlava působila shora ve středu rozpětí podpěr směrem dolů a generovala ohybový moment v mediánové oblasti vzorku.

Zatěžování probíhalo s řízenou rychlostí až do dosažení meze pevnosti a následného porušení zkušebního tělesa. Doba trvání jednotlivých zkoušek se v závislosti na míře degradace materiálu pohybovala v intervalu přibližně 70–80 s. Metodika tříbodového ohybu je pro dřevo a desky standardizována normou EN 310 pro desky na bázi dřeva, a je vhodná pro hodnocení ohybové tuhosti a pevnosti. Vzhledem ke specifickému charakteru vzorků po požární expozici však použité rozměry těles neodpovídaly plně normovým požadavkům, a výsledky jsou proto interpretovány jako komparativní hodnocení jednotlivých variant.



Obr. 22 Testovací sestava skládající se z TIRA Test 2850 a systému ARAMIS.

Pro detailní analýzu deformací byl použit digitální obrazový korelační systém (*Digital Image Correlation*, DIC) ARAMIS (Carl Zeiss GmbH, Německo), založený na dvojici synchronizovaných optických kamer (obr. 22), které snímají povrch vzorku v průběhu zatěžování. Aby bylo možno realizovat přesnou korelační analýzu, byla zkušební tělesa z jedné strany opatřena tzv. speckle rastrem. Na povrch byla nejprve aplikována souvislá bílá podkladová vrstva a následně jemný nástřík černého aerosolu (obr. 23), které vytvářejí kontrastní rastr. Kvalita a jemnost rastru zásadně ovlivňuje prostorové rozlišení a přesnost vyhodnocení.

Během zkoušky pořizovaly kamery v definovaných intervalech sekvenci snímků, z nichž software ARAMIS digitálně identifikoval jednotlivé rastrové body a sledoval jejich relativní posuny. Z těchto dat jsou rekonstruována pole posunů a lokální přetvoření na povrchu vzorku v závislosti na čase a zatížení.



Obr. 23 Příprava vzorku s rovnoměrným rastrem.

4.3.4.2 Specifika hodnocení ohořelých a povrchově modifikovaných vzorků

Specifikem této série bylo, že vzorky byly různě povrchově ošetřené a různě ohořelé, s odlišným stupněm pyrolýzy a degradace svrchních vrstev. Nebylo proto možné jednoznačně a exaktně definovat efektivní průřez nosné části vzorku podílející se na přenosu ohybového namáhání, což je u dřeva po požáru běžný problém v důsledku tvorby zuhelnatělé vrstvy a teplotně ovlivněné zóny.

U některých variant docházelo ke značné degradaci povrchové vrstvy: materiál byl pyrolýzovaný, zkřehnutý a lokálně se odlupoval nebo ztrácel soudržnost s podkladovými vrstvami. Z tohoto důvodu byla při vyhodnocení DIC analyzována deformace primárně na úrovni druhé vrstvy dýhy, tedy na spodní straně překližky, která u všech hodnocených variant požární expozici přečkala bez ztráty kontinuity a soudržnosti. Tím se eliminoval vliv náhodného odlupování silně degradovaných povrchových vrstev a zvýšila se konzistence dat.

Pro stanovení míry zachování nosné funkce ohořelých kompozitů byla zvolena metoda tříbodového ohybu. Vyhodnocování probíhalo kombinací synchronizovaných silově-deformačních dat ze zkušebního stroje a bezkontaktních deformometrických dat ze systému ARAMIS. Využití digitální korelace obrazu umožnilo sledovat pole deformací i v místech, kde lokální degradace povrchu znemožňuje použití klasických kontaktních snímačů.

4.3.4.3 Vyhodnocení ohybové tuhosti

Základním sledovaným parametrem je ohybová tuhost k , definovaná jako sklon počáteční lineárně-elastické části křivky závislosti síly na průhybu. Tento parametr přímo reflektuje interakci mezi účinným pracovním průřezem a reziduálními materiálovými charakteristikami jádra vzorku.

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad (13)$$

kde F značí sílu v N a y je deformace v mm.

Se vzrůstající mírou ohoření dochází k progresivní redukci účinného průřezu vlivem pyrolýzy a k hloubkové degradaci lignocelulózové matrice v teplotně ovlivněné zóně. Porovnáním tuhosti mezi jednotlivými variantami retardačních úprav lze kvantifikovat jejich schopnost chránit vnitřní integritu materiálu a zachovat integrální nosnost i po intenzivním požárním zatížení.

4.3.4.4 Zdánlivý modul pružnosti v ohybu

Vzhledem ke specifickému stavu vzorků po požární expozici byl pro materiálové srovnání zaveden termín zdánlivý modul pružnosti v ohybu E_{zdan} . Tento přístup je nezbytný z následujících důvodů:

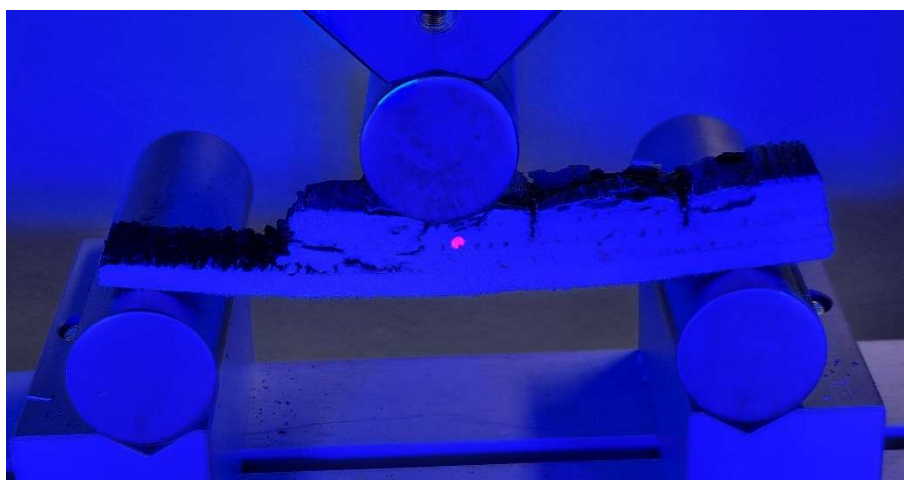
- **Geometrická neurčitost:** intenzivní tvorba zuhelnatělé vrstvy (*char layer*) a její nepravidelné odpadávání znemožňují exaktní měření reziduálních rozměrů průřezu (b , h). Standardní nominální rozměry jsou vlivem pyrolýzy nerepresentativní.
- **Absence homogenního pole napětí:** přítomnost pyrolýzní zóny, tedy gradientního přechodu mezi uhlíkatou vrstvou a intaktním dřevem, způsobuje, že vzorek již nevykazuje homogenní vlastnosti předpokládané klasickou mechanikou.
- **Omezená platnost Euler-Bernoulliho hypotézy:** vlivem lokálních materiálových defektů a degradace adhezivních spojů, zejména u vzorků s PUR matricí, nelze garantovat zachování rovinnosti průřezů. Standardní ohybová čára je v tomto stavu spíše teoretickou aproximací než exaktním fyzikálním popisem.

Zdánlivý modul pružnosti byl vypočten podle vztahu:

$$E_{zdan} = \frac{L^3 \cdot k}{4 \cdot b \cdot h^3} \quad (14)$$

kde L je rozpětí podpor [mm], b , h jsou uvažované rozměry reziduálního průřezu [mm] a k je tuhost v ose y .

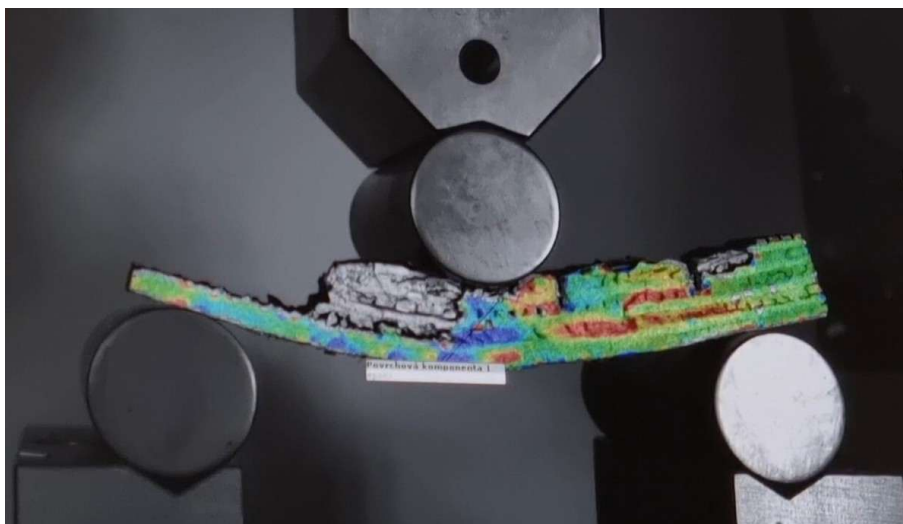
Dalším klíčovým parametrem byla maximální dosažená zatěžovací síla odpovídající mezi pevnosti v ohybu, která reprezentuje reziduální ohybovou pevnost po požáru. Pro účely



Obr. 24 Reálný snímek během zkoušky.

komparace byly vypočteny procentuální poklesy maximální síly mezi referenčním, tedy minimálně ohořelým či nepoškozeným stavem, a jednotlivými ohořelými vzorky.

Tímto způsobem byla kvantifikována ztráta únosnosti v závislosti na míře ohoření a teplotní expozici, přičemž tento přístup integruje vliv sníženého průřezu i změny materiálových parametrů v důsledku pyrolýzy (obr. 24, 25).



Obr. 25 Vyhodnocení deformací pomocí DIC (ARAMIS).

4.4 Vyhodnocení experimentálních dat a parametrizace prediktivního modelu

Tato kapitola popisuje způsob zpracování experimentálních dat získaných při hodnocení požárního chování a reziduálních mechanických vlastností vyvíjených materiálů. Data ze stanovení optické hustoty kouře, měření rychlosti šíření plamene po povrchu i analýzy reziduálních mechanických vlastností exponovaného kompozitu byla nejprve vyhodnocena podle příslušných normových postupů. Získané hodnoty sloužily k porovnání jednotlivých materiálových variant a k posouzení vlivu použitých zpomalovačů hoření a lepicích systémů.

Nad rámec normového vyhodnocení byla data z kónické kalorimetrie dále zpracována pomocí numerického modelu. Tento postup byl zvolen proto, že průběh hoření vrstvených lignocelulózových materiálů se zpomalovači hoření nemusí mít jednoduchý jednovrcholový průběh. V naměřených křivkách se může projevit postupná aktivace jednotlivých dýhových vrstev, dočasné zpomalení hoření vlivem zuhelnatělé vrstvy a následné opětovné zesílení reakce po proniknutí tepla do hlubších vrstev.

Pro popis těchto průběhů byl použit model založený na součtu dvou Weibullových funkcí se společným počátkem času. Tento typ funkce je vhodný pro asymetrické jednovrcholové průběhy, u nichž náběh a pokles procesu neprobíhají stejnou rychlostí. Model tak umožňuje popsat naměřenou křivku jako součet dvou dílčích fází hoření s rozdílnou časovou odezvou.

4.4.1 Weibullovo rozdělení jako aproximační báze

Weibullovo rozdělení bylo použito ve tvaru:

$$W(t) = A, k, \lambda (\lambda t)^{k-1} \exp[-(\lambda t)^k], \quad t > 0 \quad (15)$$

kde $A > 0$ je amplituda, $k > 0$ je tvarový parametr, a $\lambda > 0$ je parametr časové škály.

Tento tvar je vhodný zejména pro procesy s jedním maximem a asymetrickým průběhem. Na rozdíl od Gaussovy funkce, která je symetrická, umožňuje Weibullovo rozdělení popsat rychlý náběh a pomalejší pokles, což dobře odpovídá průběhu hoření vrstvených materiálů.

V případě hoření lze tuto funkci chápat jako zjednodušený popis časového rozložení dílčích procesů, které se v materiálu aktivují postupně. Měřená veličina, například rychlost uvolňování tepla, pak představuje celkovou odezvu těchto dílčích procesů.

4.4.2 Model součtu dvou Weibullových funkcí.

Pro popis experimentálního průběhu je použit model:

$$y(t) = W_1(t) + W_2(t) \quad (16)$$

kde jednotlivé příspěvky mají tvar:

$$W_i(t) = A_i, k_i, \lambda_i (\lambda_i t)^{k_i-1} \exp[-(\lambda_i t)^{k_i}], \quad i = 1, 2 \quad (17)$$

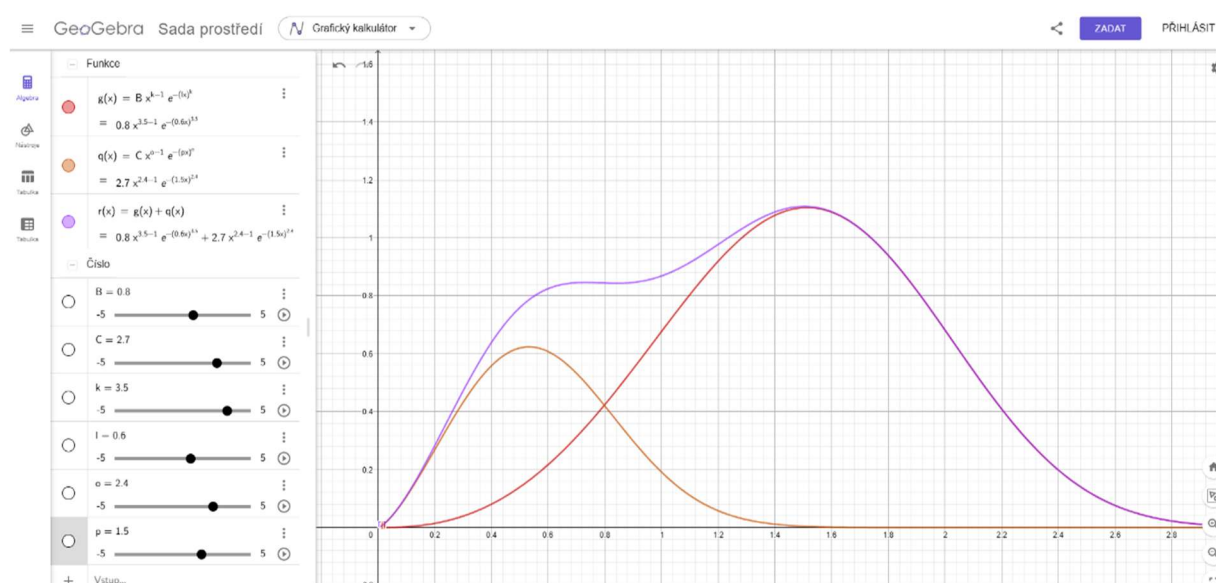
Jde o součet dvou asymetrických jednovrcholových funkcí, které reprezentují dvě překrývající se fáze hoření. První člen může odpovídat počátečnímu hoření vrstvy ovlivněné retardérem, zatímco druhá složka může souviset s pozdější aktivací hlubších vrstev materiálu nebo s následným rozvinutím pyrolýzního procesu. Výhodou tohoto přístupu je relativně malý

počet parametrů, hladkost výsledné funkce a možnost přímé interpretace jednotlivých koeficientů.

Poloha maxima každého Weibullova příspěvku je dána vztahem:

$$t_{p,i} = \frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{k_i - 1}{k_i} \right)^{1/k_i} \quad k_i > 1, \quad (18)$$

což ukazuje, že rozdílná poloha vrcholů vzniká přirozeně kombinací tvarového a škálového parametru. Není tedy nutné zavádět explicitní časový posun, pokud je cílem především kompaktní aproximační model a nikoli detailní mechanistická rekonstrukce děje.



Obr. 26 Ukázka modelu v programu GeoGebra s oběma Weibullovými funkcemi a jejich součet.

4.4.3 Interpretace parametrů modelu

Každý z parametrů Weibullové funkce má v kontextu hoření vrstevnatého materiálu interpretovatelný význam.

- **Amplituda A_i** udává celkový příspěvek dané fáze ke sledované veličině. V případě měření typu *HRR* (Heat Release Rate) je úměrná celkovému množství energie uvolněné v dané fázi nebo efektivnímu množství aktivního materiálu, které se na této fázi podílí.
- **Tvarový parametr k_i** řídí dynamiku náběhu a doznívání procesu. Pro $k_i > 1$ se proces v čase zrychluje, což odpovídá koherentnímu rozvoji reakce. Menší hodnoty k_i vedou k ploššímu, více rozptýlenému průběhu a delšímu ocasu.
- **Parametr časové škály λ_i** určuje, v jakém časovém intervalu daná fáze probíhá. Vyšší hodnota λ_i odpovídá rychlejšímu průběhu a dřívejšímu dosažení maxima, zatímco nižší hodnota λ_i indikuje pomalejší a časově roztaženější proces.

Z hlediska vrstevnatého materiálu lze první a druhou Weibullovu složku chápat jako dvě překrývající se fáze odezvy materiálu na tepelné zatížení. U vrstevnatého materiálu může první složka odpovídat iniciaci a rozvoji hoření povrchové vrstvy, zatímco druhá složka může souviset s termickou penetrací do hlubších vrstev, aktivací další dýhové vrstvy nebo porušením ochranné zuhelnatělé bariéry.

4.4.4 Odhad parametrů a stabilita modelu

Při aplikaci dvou Weibullových funkcí je vhodné brát v úvahu identifikovatelnost parametrů. Parametry k_i a λ_i jsou částečně korelované, protože společně určují polohu maxima a celkový tvar píku. Z tohoto důvodu je vhodné parametry odhadovat postupně a s vhodnými počátečními odhady založenými na experimentálním grafu.

Nejprve byla určena přibližná poloha obou maxim, poté šířka jednotlivých píků a následně byla provedena nelineární optimalizace všech parametrů. Tento postup snižuje riziko konvergence k nevhodnému řešení a zvyšuje stabilitu výsledného proložení.

Pokud jsou obě fáze hoření výrazně oddělené, je odhad parametrů stabilnější. V případě výrazného překryvu píků je nutné výsledky interpretovat opatrně. V takových případech je vhodné klást větší důraz na celkový tvar modelované křivky a integrální charakteristiky než na izolované hodnoty jednotlivých koeficientů.

4.4.5 Aplikace na hoření vrstevnatého materiálu s retardérem

V případě vrstevnatého materiálu s retardérem lze první Weibullovu složku interpretovat jako počáteční reakci horní vrstvy, v níž retardér zpomaluje rozvoj hoření a prodlužuje náběh. Druhá složka pak odpovídá pozdější fázi, kdy je tepelný tok již dostatečný k aktivaci hlubší vrstvy a k opětovnému zesílení reakce. Celkový signál je tedy výsledkem superpozice dvou mechanismů s odlišnou časovou škálou.

Takový model je vhodný zejména tehdy, pokud experimentální průběh vykazuje dvě dominantní maxima, případně maximum a následné rameno, nebo plošší oblast mezi dvěma fázemi. Weibullův model je v tomto ohledu výhodný, protože umožňuje reprezentovat jak

počáteční inhibovaný rozvoj hoření, tak pozdější zesílení reakce, aniž by bylo nutné explicitně modelovat všechny mikroskopické reakční mechanismy.

4.4.6 Dílčí syntéza poznatků

Součet dvou Weibullových funkcí představuje kompaktní, hladký a statisticko-fyzikálně interpretovatelný model pro analýzu hoření vrstevnatého materiálu s retardérem. Weibullovo rozdělení je vhodné díky své asymetrii, s jedním vrcholem a schopností modelovat rozdělení časů aktivace elementárních procesů. Parametry A_i , k_i a λ_i mají přímý význam ve smyslu celkového příspěvku, dynamiky reakce a časové škály procesu.

Výsledný model je dostatečně flexibilní pro popis vícefázového hoření a zároveň dostatečně jednoduchý pro robustní odhad parametrů z experimentálních dat.

5 Výsledky

Tato kapitola shrnuje výsledky experimentálního hodnocení připravených materiálových variant. Cílem bylo posoudit, jak se použitá úprava dřeva a typ lepicího systému projeví na požárním chování, vývoji kouře, prostupu tepla do tloušťky materiálu a na zachování mechanických vlastností po tepelné expozici.

Hodnoceno bylo celkem deset variant překližovaného aglomerovaného materiálu na bázi smrkových dřev (*Picea abies*). Jednotlivé varianty se lišily typem aplikovaného zpomalovače hoření, jeho umístěním ve skladbě a použitým lepicím systémem.

Výsledky vycházejí ze zkoušek kónické kalorimetrie, stanovení optické hustoty kouře, hodnocení laterálního šíření plamene, měření teplotního pole v tloušťce materiálu a následného testování reziduálních mechanických vlastností. Součástí vyhodnocení bylo také sledování deformací pomocí metody digitální obrazové korelace.

Následující podkapitoly postupně hodnotí rychlost uvolňování tepla, tvorbu kouře, šíření plamene, vstup tepla do jednotlivých vrstev a mechanickou odezvu materiálu po požární expozici. Výsledky jsou porovnávány mezi jednotlivými variantami s cílem určit, které úpravy nejvíce přispěly ke zlepšení požárního chování a zachování soudržnosti materiálu.

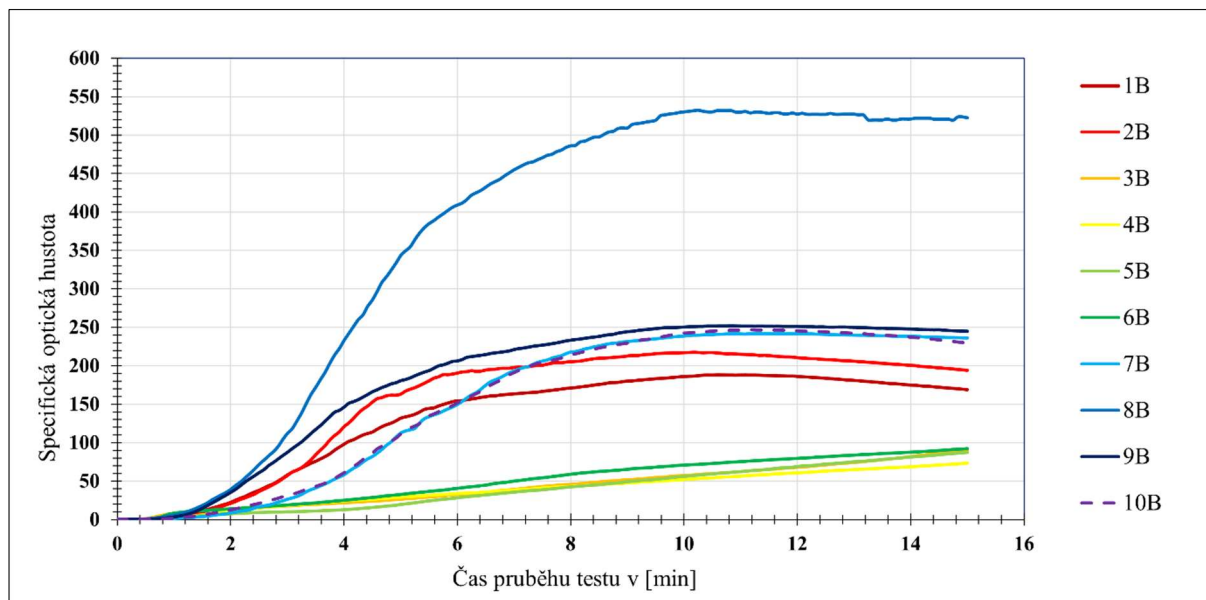
5.1 Analýza vývoje kouře a optické hustoty

Vývoj kouře představuje jeden z důležitých parametrů požárního chování materiálů, protože kouř může významně omezit viditelnost a tím ztížit orientaci a evakuaci osob. Z tohoto důvodu byla u jednotlivých materiálových variant hodnocena specifická optická hustota kouře D_s podle ČSN EN ISO 5659-2.

Kouř vznikající při tepelném rozkladu a hoření obsahuje pevné částice, kapalně aerosoly i plynné produkty. Jeho hlavním sledovaným účinkem v této části práce bylo snížení propustnosti světla v měřicí komoře, které se projevuje růstem hodnoty specifické optické hustoty.

Při interpretaci naměřených hodnot byla sledována zejména hodnota D_s po 4 minutách, po 10 minutách a maximální dosažená hodnota $D_{s,max}$. Tyto parametry umožňují porovnat nejen celkovou kouřivost jednotlivých variant, ale také rychlost nárůstu kouře v průběhu expozice.

Na základě průběhu specifické optické hustoty kouře v Grafu 1 byly jednotlivé varianty rozděleny do tří skupin podle dosažené hodnoty $D_{s,max}$. Toto rozdělení slouží k přehlednému porovnání materiálů z hlediska intenzity kouřivosti.



Graf 1 Vývoj specifické optické hustoty kouře D_s .

5.1.1 Varianty s nízkou emisí kouře, $D_{s,max} = 0-100$

Do této skupiny patřily modifikované varianty **3B**, **4B**, **5B** a **6B**. Tyto vzorky vykazovaly nejnížší hodnoty specifické optické hustoty kouře. Maximální hodnota $D_{s,max}$ se u nich pohybovala přibližně v rozmezí 73,5–92,4. Nejnížší hodnota byla zjištěna u varianty **4B**, u které $D_{s,max}$ dosáhla hodnoty $73,5 \pm 5,8$. Velmi nízké hodnoty byly zaznamenány také u variant **3B**, **5B** a **6B**, jejich maximální specifická optická hustota nepřekročila hodnotu 100.

Nízké hodnoty D_s naznačují, že použité úpravy u těchto variant účinně omezily tvorbu kouře. To může souviset s podporou tvorby stabilnější zuhelnatělé vrstvy, která omezuje uvolňování těkavých produktů tepelného rozkladu.

5.1.2 Varianty se střední emisí kouře, $D_{s,max} = 100-250$

Do této skupiny lze zařadit varianty **1B**, **2B**, **7B** a **10B**. Referenční varianta **10B** dosáhla hodnoty $D_{s,max} = 248,1 \pm 31,6$, což je výrazně více než u nejlépe hodnocených modifikovaných variant.

Varianta **1B** dosáhla hodnoty $D_{s,max} = 188,4 \pm 37,2$ a varianta **2B** hodnoty $217,2 \pm 11,9$. Varianta **7B**, která obsahovala vrstvy impregnované černým louhem, vykazovala hodnotu $D_{s,max} = 243,2 \pm 11,6$, tedy hodnotu blízkou referenční variantě.

Tyto výsledky ukazují, že některé úpravy sice vedly ke snížení kouřivosti oproti nejhorší variantě, ale jejich účinek nebyl tak výrazný jako u variant **3B–6B**. Zejména varianta **7B** se z hlediska maximální optické hustoty přiblížila referenčnímu vzorku.

5.1.3 Varianta s vysokou emisí kouře, $D_{s,max} > 400$

Nejvyšší hodnoty specifické optické hustoty kouře byly zaznamenány u varianty **8B**, u které bylo použito jednosložkové polyuretanové lepidlo KESTOPUR 1010 bez impregnace dýh. Tato varianta dosáhla hodnoty $D_{s,max} = 542,6 \pm 36,6$. Současně vykazovala vysokou hodnotu již po 4 minutách expozice, konkrétně $232,9 \pm 31,0$.

Výsledek naznačuje, že samotné použití polyuretanového lepidla bez dalších úprav dýh vedlo k výrazně vyšší kouřivosti než u variant s fenol-formaldehydovým lepidlem a impregnačními zpomalovači hoření. V porovnání s referenční variantou **10B** byla maximální specifická optická hustota u varianty **8B** více než dvojnásobná.

Při porovnání Grafu 1 a Tabulky 4 je patrné, že modifikované varianty **3B–6B** vykazovaly výrazně nižší kouřivost než referenční vzorek **10B** i varianta **8B**. Nejlepší výsledky byly dosaženy u variant **4B**, **5B** a **6B**, jejichž hodnoty $D_{s,max}$ zůstaly pod hranicí 100.

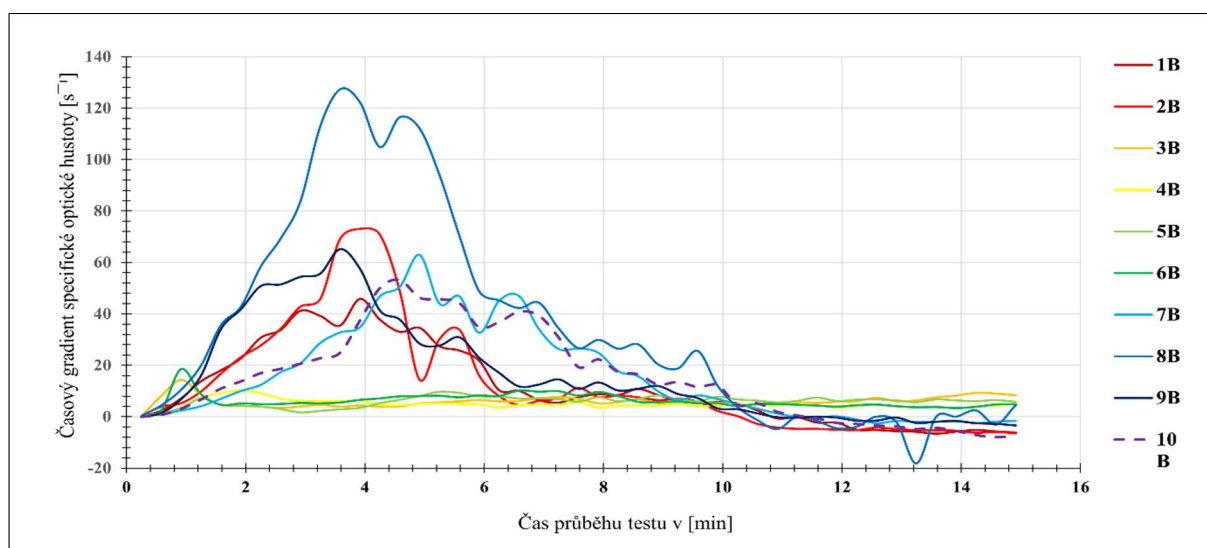
Z hlediska tvorby kouře lze za nejúčinnější považovat varianty, u nichž byla omezena rychlost i celková intenzita vývoje kouře. To platí zejména pro varianty **3B–6B**, které vykázaly nejnižší maximální hodnoty specifické optické hustoty.

Tabulka 4 Souhrnné hodnoty ke specifické optické hustotě kouře

Kód vzorku	Hustota v [kg·m ⁻³]		Specifická optická hustota po 4 min.		Specifická optická hustota po 10 min.		Maximální specifická optická hustota	
	Průměr ze 3	směr. odchylka	Průměr ze 3	směr. odchylka	Průměr ze 3	směr. odchylka	Průměr ze 3	směr. odchylka
1 B	544,7	8,1	97,9	24,0	185,9	38,5	188,4	37,2
2 B	521,8	21,7	120,4	4,0	216,5	12,2	217,2	11,9
3 B	622,2	23,6	21,9	8,5	57,3	10,3	90,8	9,0
4 B	529,9	2,2	24,3	8,1	52,0	8,0	73,5	5,8
5 B	561,9	7,7	20,6	1,0	64,3	1,0	90,8	8,3
6 B	550,1	43,4	25,0	1,5	70,9	3,2	92,4	1,8
7 B	608,4	8,0	59,9	8,7	237,4	10,2	243,2	11,6
8 B	542,8	6,2	232,9	31,0	530,1	55,3	542,6	36,6
9 B	509,0	6,0	146,1	3,9	250,1	7,3	255,5	8,4
10 B	606,6	9,8	60,8	17,9	242,4	36,0	248,1	31,6

5.1.4 Rychlost změny specifické optické hustoty dD_s/dt

První derivace specifické optické hustoty kouře vyjadřuje kinetiku uvolňování kouře, která definuje rychlost zakouření daného prostředí a s tím korelující gradient poklesu viditelnosti.



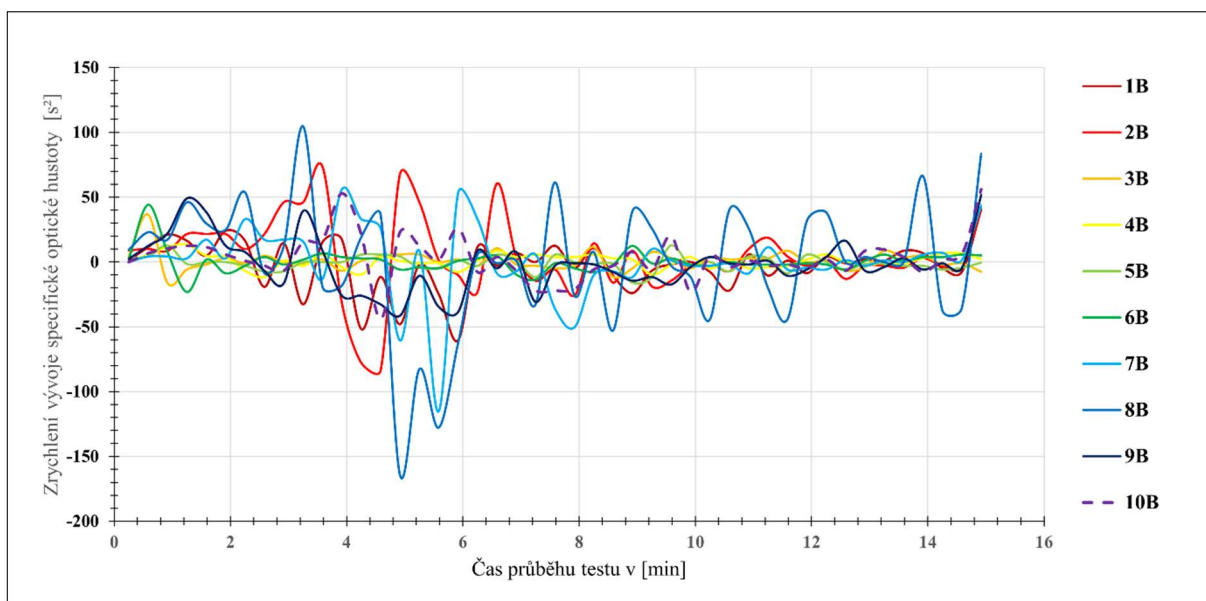
Graf 2 Rychlost změny specifické optické hustoty dD_s/dt .

Referenční varianta **10B** vykazuje výrazné píky v raných fázích tepelného rozkladu. Tyto špičky korelují s postupným prohoříváním jednotlivých dýhových vrstev a s nárazovým uvolňováním těkavých produktů pyrolýzy.

U nejlépe hodnocených variant, zejména **3B–6B**, byly píky první derivace výrazně nižší. To naznačuje rovnoměrnější průběh tepelného rozkladu a nižší rychlost uvolňování kouře. Tento efekt může souviset se vznikem stabilnější zuhelnatělé vrstvy, která omezuje uvolňování těkavých produktů z vnitřních vrstev překližky.

5.1.5 Zrychlení specifické optické hustoty $d^2 DS / dt^2$

Druhá derivace specifické optické hustoty byla použita jako doplňkový ukazatel stability vývoje kouře. Umožňuje zachytit okamžiky, kdy se rychlost tvorby kouře náhle zvyšuje nebo snižuje.



Graf 3 Zrychlení specifické optické hustoty $d^2 Ds / dt^2$.

U referenční varianty **10B** byly v Grafu 3 patrné výraznější oscilace a špičky v kladných hodnotách. Tyto změny mohou odpovídat okamžikům zrychlené degradace, například při narušení zuhelnatělé vrstvy, odkrytí další dýhové vrstvy nebo lokálním selhání lepeného spoje.

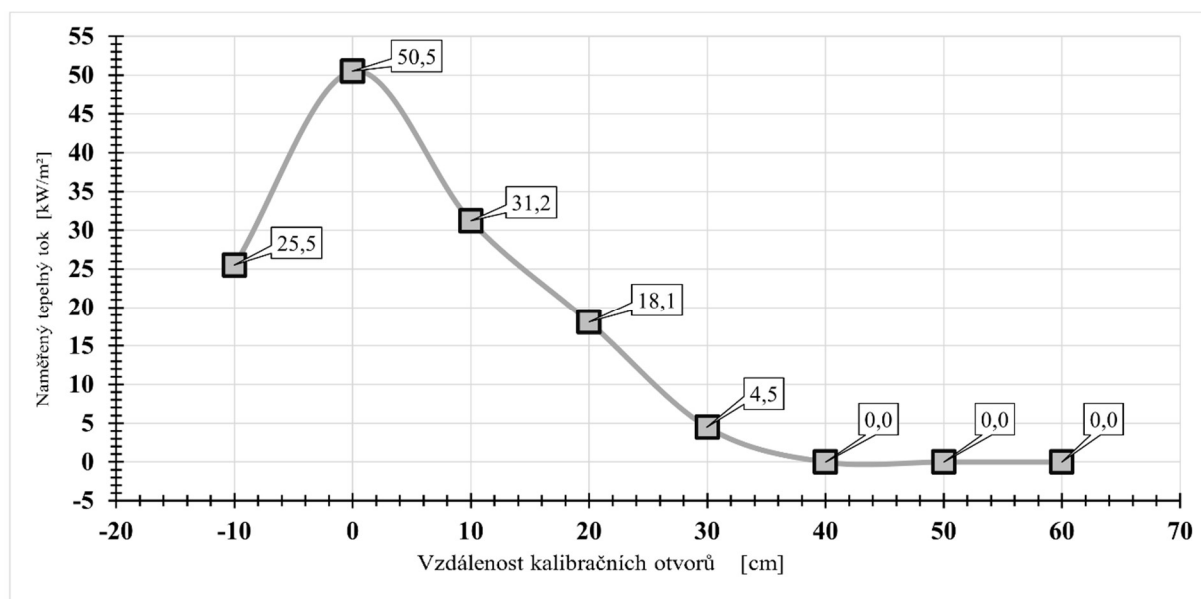
U modifikovaných variant byly změny druhé derivace méně výrazné. To naznačuje stabilnější průběh vývoje kouře a menší sklon k náhlým akceleračním skokům. Nejvýraznější stabilizace byla pozorována u variant s nízkou hodnotou $D_{s,max}$, zejména u variant **3B–6B**.

Celkově lze říci, že modifikace dých a lepicích systémů ovlivnily nejen maximální hodnotu kouřivosti, ale také časový průběh jejího vývoje. Varianty **3B–6B** vykazovaly nižší hodnoty $D_{s,max}$, pomalejší nárůst optické hustoty a stabilnější průběh první i druhé derivace. Tyto výsledky ukazují na účinnější omezení tvorby kouře a rovnoměrnější průběh tepelného rozkladu.

5.2 Vyhodnocení laterálního šíření plamene po svislé ploše (ISO 5658–2)

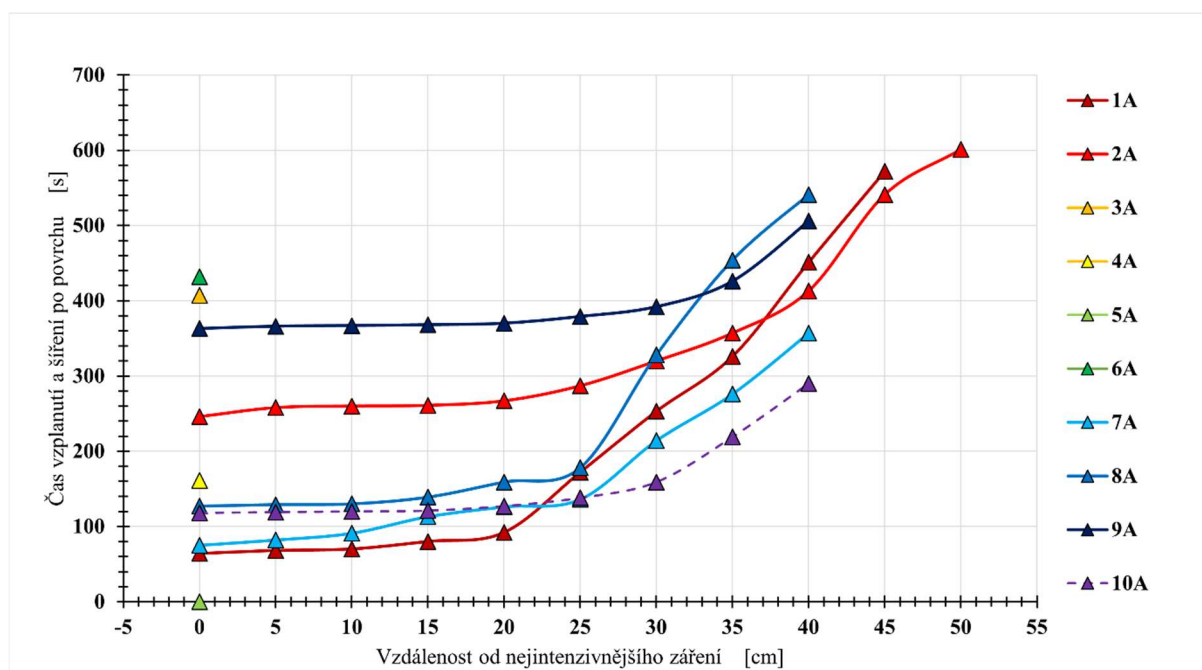
V rámci první fáze experimentálního stanovení laterálního šíření plamene byla provedena přesná kalibrace distribučního profilu incidentního tepelného toku. Namísto zkušební vzorku byla do aparatury instalována kalibrační deska osazená radiometrem v definovaných intervalech.

Jak dokumentuje Graf 4, nejvyšší hodnota tepelného toku byla naměřena v bodě 0, kde dosáhla $50,5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Směrem od zdroje tepla docházelo k postupnému poklesu sálavého tepelného toku. Naměřené hodnoty v kontrolních bodech (10, 20 a 30 cm) sloužily jako kalibrační podklad pro interpretaci šíření plamene a stanovení tepelného zatížení v jednotlivých částech vzorku.



Graf 4 Kalibrační diagram tepelného toku zářiče.

Vlastní zkouška šíření plamene sledovala kinetiku postupu fronty plamene po povrchu materiálu. Primárním sledovaným parametrem byl čas iniciace trvalého plamene v bodě maximální iradiace, tedy v bodě 0, a následná rychlost šíření plamene v pěticentimetrových intervalech až do vzdálenosti 50 cm. Výsledné trajektorie šíření plamene v čase jsou vizualizovány na Grafu 5.



Graf 5 Laterální šíření po povrchu.

Naměřená data ukázala rozdíly mezi modifikovanými variantami a referenčním vzorkem **10A**. Obecně platí, že v oblasti nejvyššího tepelného zatížení, tedy přibližně do 20 cm od bodu iniciace, byl postup plamene nejrychlejší. Se vzrůstající vzdáleností od zářiče a s poklesem tepelného toku se u modifikovaných vzorků šíření plamene zpomalovalo.

Nejlepší chování vykazovaly varianty **5A**, **6A**, **3A** a **4A**. U těchto vzorků došlo buď pouze k lokální iniciaci plamene, nebo se plamen dále po povrchu nešířil. U varianty **5A** nebyla během testu zaznamenána iniciace trvalého plamene, tedy hoření delší než 5 s. Tato varianta proto vykazovala nejvyšší odolnost vůči sálavému tepelnému zatížení.

Varianta **1A** vykazovala kratší čas do iniciace trvalého hoření, což naznačuje nižší odolnost povrchové vrstvy vůči počátečnímu zážehu. Po opuštění oblasti nejvyššího tepelného toku však došlo ke zpomalení šíření plamene. Tento výsledek ukazuje, že použitá úprava sice méně účinně bránila iniciaci, ale mohla omezovat další šíření plamene mimo oblast intenzivního ohřevu.

Celkově lze říci, že aplikované úpravy snížily laterální šíření plamene ve srovnání s referenční variantou **10A**. Nejvýraznější účinek byl zaznamenán u variant, u nichž došlo k omezení šíření plamene již v počáteční části zkoušky.

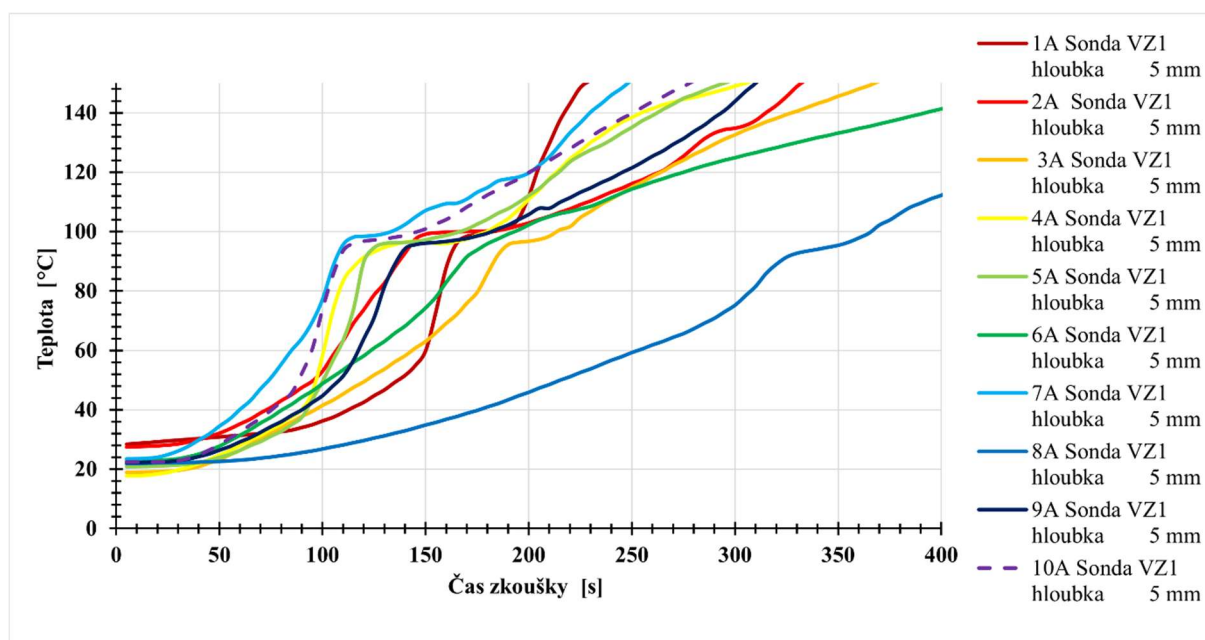
5.2.1 Vyhodnocení instrumentace a měření teplotních profilů

Zkouška laterálního šíření plamene byla rozšířena o měření vnitřních teplotních profilů. Do zkušebních těles byly v definovaných vzdálenostech od zdroje tepla a v určených hloubkách instalovány termočlánky typu K. Tato úprava umožnila sledovat prostup tepla materiálem a zaznamenat teplotu na neexponované straně vzorku.

Získaná teplotní data umožnila porovnat jednotlivé varianty nejen podle povrchového šíření plamene, ale také podle rychlosti prostupu tepla do tloušťky překližovaného materiálu. Pro vyhodnocení byly z celkového souboru dat vybrány reprezentativní záznamy, které jsou uvedeny v následujících grafech. Levá část grafů znázorňuje prostup tepla v tloušťce materiálu, pravá část pak vývoj teploty na zadní, neexponované straně vzorku.

5.2.2 Vliv vlhkosti a izotermická prodleva

Při rozboru počáteční fáze ohřevu, znázorněné ve zvětšeném výřezu Grafu 6, byl patrný vliv vlhkosti na rychlost prostupu tepla. Důležitou hranicí je teplota přibližně 100 °C, při které dochází k odpařování vody obsažené ve dřevě. Do dosažení této teploty, narůstala teplota v materiálu poměrně rychle. Po dosažení hranice 100 °C se nárůst teploty zpomalil. Tento jev lze vysvětlit spotřebou části dodávaného tepla na odpaření volné vody a desorpci vázané vody z buněčných stěn dřeva. Fázová přeměna vody tak dočasně zpomaluje další ohřev materiálu.



Graf 6 První fáze tepelného prostupu.

5.2.3 Chování varianty 8A s PUR lepidlem

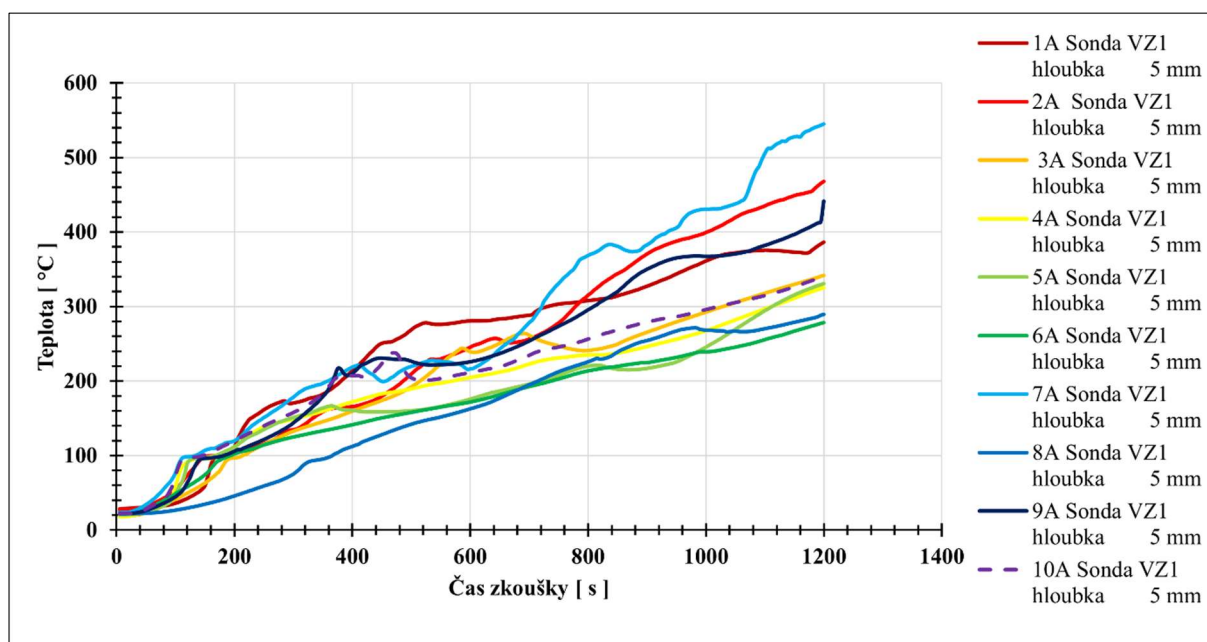
Odlišný průběh byl zaznamenán u varianty **8A**, u které bylo použito polyuretanové lepidlo KESTOPUR 1010. U tohoto vzorku byla izotermická prodleva v oblasti 100 °C méně výrazná a nárůst teploty měl lineárnější průběh.

Jednosložkové polyuretanové lepidlo třídy odolnosti D4 vytvrzuje reakcí se vzdušnou a materiálovou vlhkostí. Po vytvrzení vytváří v lepené spáře pevnou polymerní vrstvu, která může omezovat transport vlhkosti mezi jednotlivými dýhami. Lze tedy předpokládat, že u vzorku **8A** byl průběh ohřevu ovlivněn nižší dostupností vlhkosti v některých částech průřezu nebo omezenou migrací vodní páry během ohřevu

Tato interpretace je v souladu s rychlejším nárůstem teploty u varianty **8A** a s jejím méně příznivým požárním chováním v dalších zkouškách.

5.2.4 Teplotní profily v hloubce 5 mm pod exponovaným povrchem

Pro posouzení izolačního účinku jednotlivých úprav byly vyhodnoceny teplotní profily v hloubce 5 mm pod exponovaným povrchem. Sledování probíhalo ve čtyřech polohách označených jako sonda 1 až sonda 4 podle schématu na Obrázku 11 a 12. Toto uspořádání umožnilo porovnat odezvu materiálu v oblasti nejvyššího i nižšího sálavého zatížení.

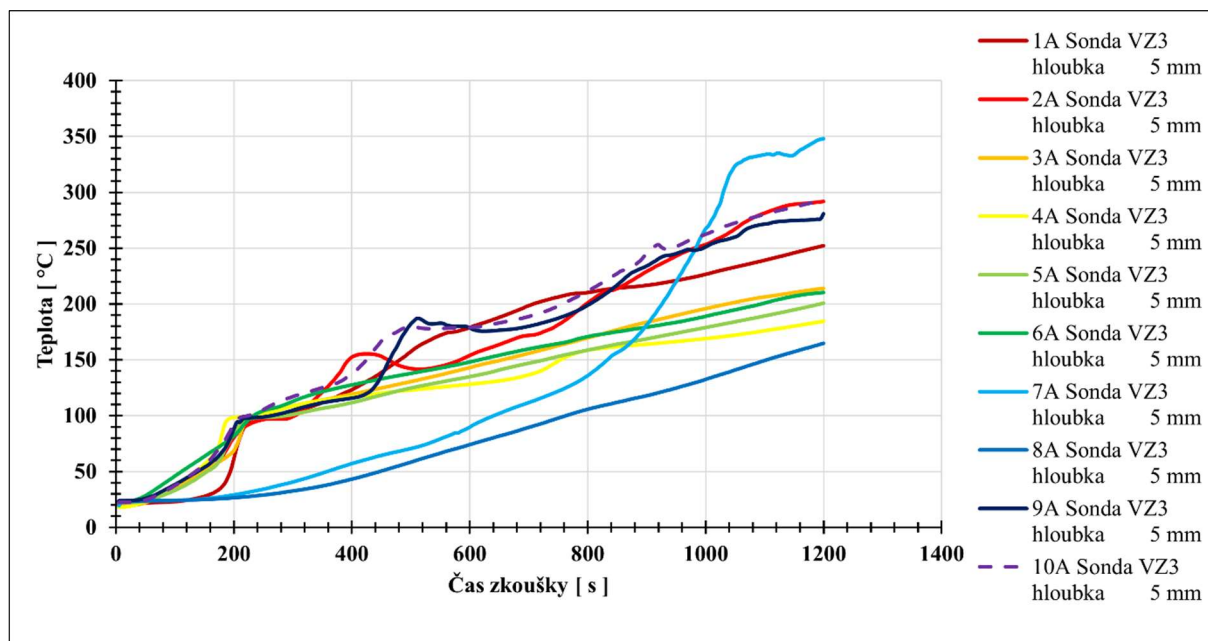


Graf 7 Srovnání průběhu teplot čidla ve vzdálenosti 1 a hloubce 5 mm.

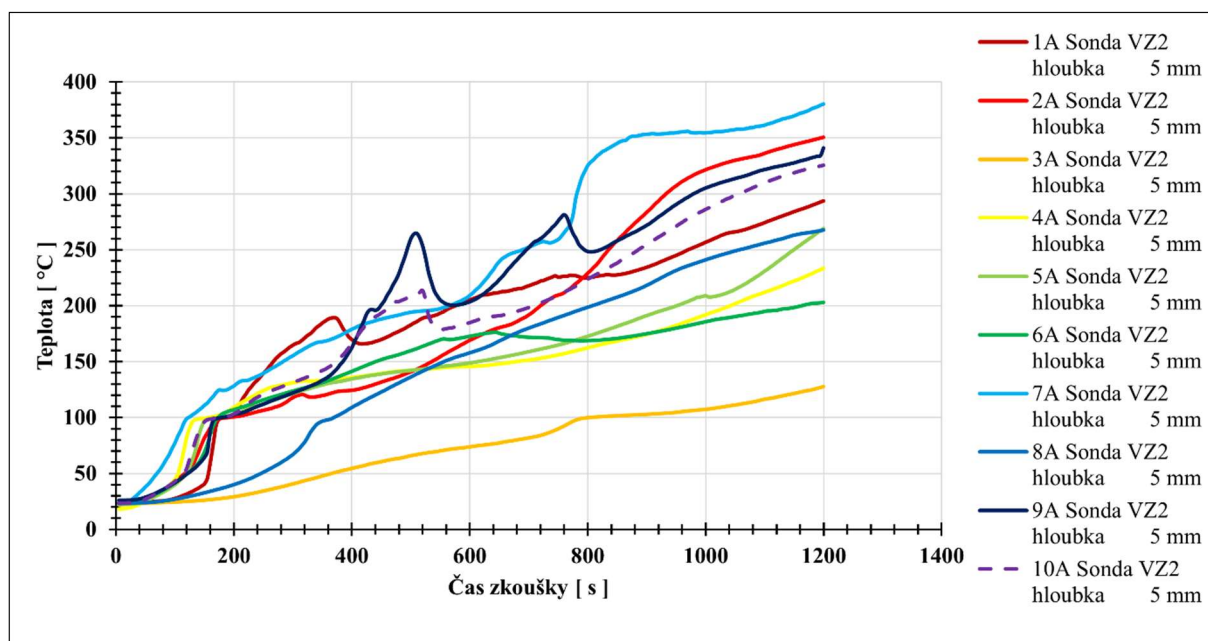
Zóna primární expozice Graf 7

V místě nejvyšší iradiace vykazují všechny varianty strmý nárůst teploty. Referenční vzorek **10A** a zejména varianta **8A** s PUR lepidlem zde dosahují teplotních maxim přesahujících 450 °C, což indikuje plně rozvinutou pyrolýzu a degradaci polymerní matrice dřeva i v hloubce 5 mm.

Naopak neúspěšnější modifikace, zejména **5A** a **6A**, vykazují v čase 1200 s teplotní stabilitu přibližně o 100 °C nižší než reference, což potvrzuje vysokou efektivitu vytvořené zuhelnatělé bariéry.



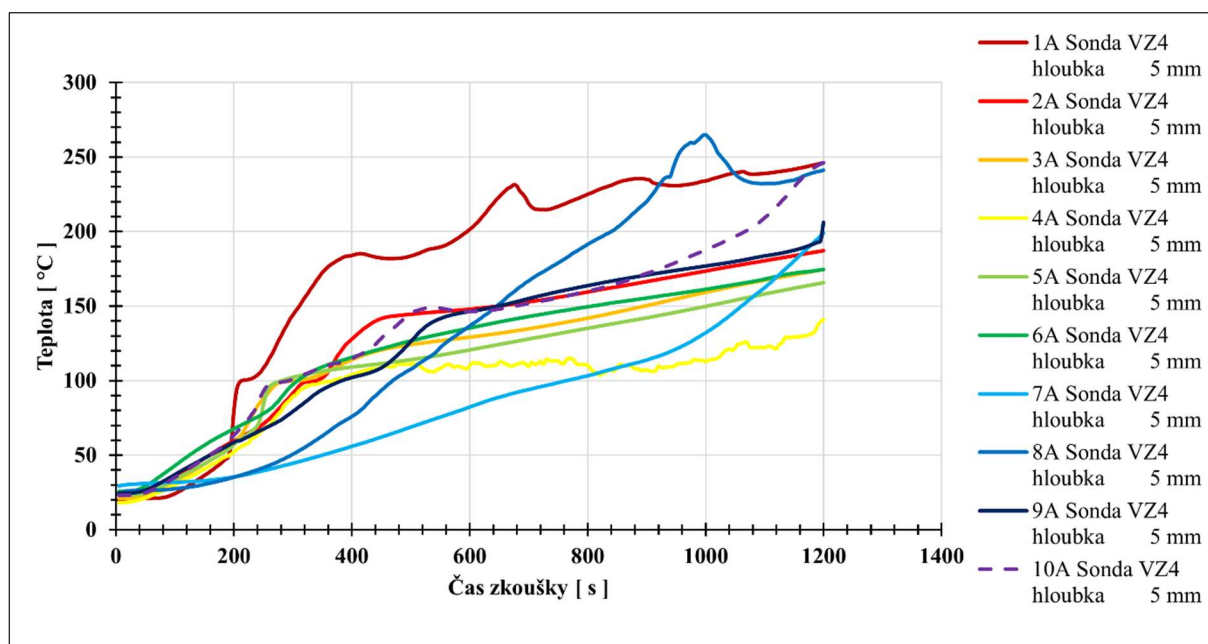
Graf 8 Srovnání průběhu teplot čidla ve vzdálenosti 2 a hloubce 5 mm.



Graf 9 Srovnání průběhu teplot čidla ve vzdálenosti 3 a hloubce 5 mm.

Zóna střední expozice – Graf 8 a Graf 9

S narůstající vzdáleností od zářiče se u modifikovaných vzorků prodlužuje fáze izotermické prodlevy u hranice 100 °C. Zatímco u referenční varianty **10A** teplota po odpaření vlhkosti opět strmě stoupá, u retardovaných variant, zejména **3A**, **4A** a **5A**, zůstává teplotní profil po dlouhou dobu lineární s velmi mírným sklonem.



Graf 10 Srovnání průběhu teplot čidla ve vzdálenosti 4 a hloubce 5 mm.

Tento průběh naznačuje, že použité zpomalovače hoření a vznikající zuhelnatělá vrstva omezovaly prostup tepla do hlubších vrstev překližky.

Okrajová zóna – Graf 10

V oblasti s nejnižším tepelným zatížením většina modifikovaných vzorků nedosáhla ani teplot výrazně převyšujících 100 °C. To znamená, že v této hloubce a vzdálenosti od zdroje tepla zůstala struktura dřeva termicky nepoškozená nebo pouze minimálně ovlivněná.

5.2.5 Komparativní zhodnocení materiálů variant

Z hlediska celkového profilu vykazují varianty **5A** a **6A** nejstabilnější ochranný účinek napříč všemi měřicími body. Jejich schopnost tlumit teplotní nárůst je patrná zejména v raných

fázích testu, kde efektivně prodlužují dobu do dosažení kritické teploty 200 °C, která je považována za hranici počátku termické degradace hemicelulóz.

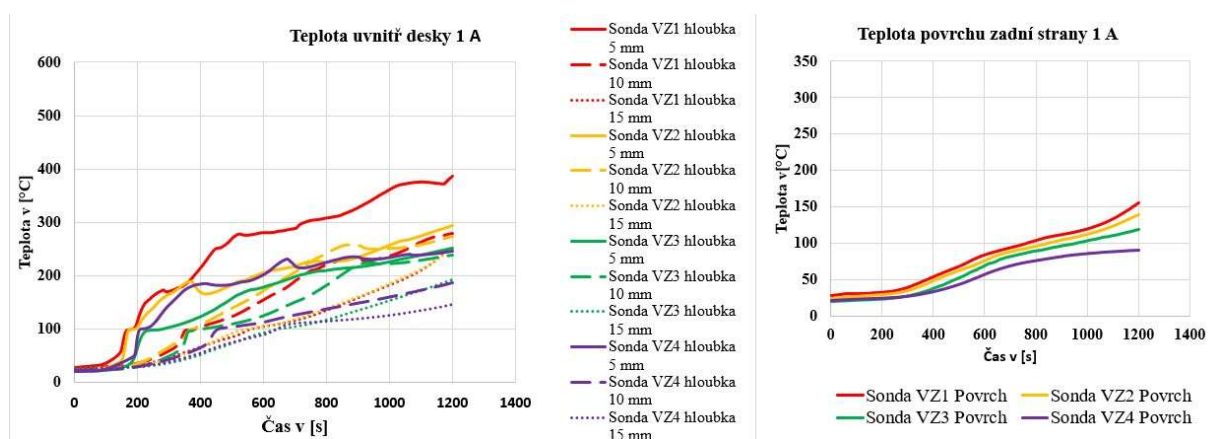
Naopak varianta **8A** s PUR lepidlem vykazovala nejrychlejší nárůst teploty v hloubce 5 mm. Méně výrazná prodleva v oblasti 100 °C a rychlejší prostup tepla podporují předpoklad, že u této varianty byl odlišný transport vlhkosti a tepla v lepené skladbě.

Z hlediska požární integrity se varianta **8A** jeví jako nejméně stabilní, neboť teplotní fronta u ní postupuje materiálem s minimálním odporem. Tento výsledek koreluje s dříve naměřenými vysokými hodnotami rychlosti uvolňování tepla (*HRR*) a s celkově horší požární odezvou této varianty.

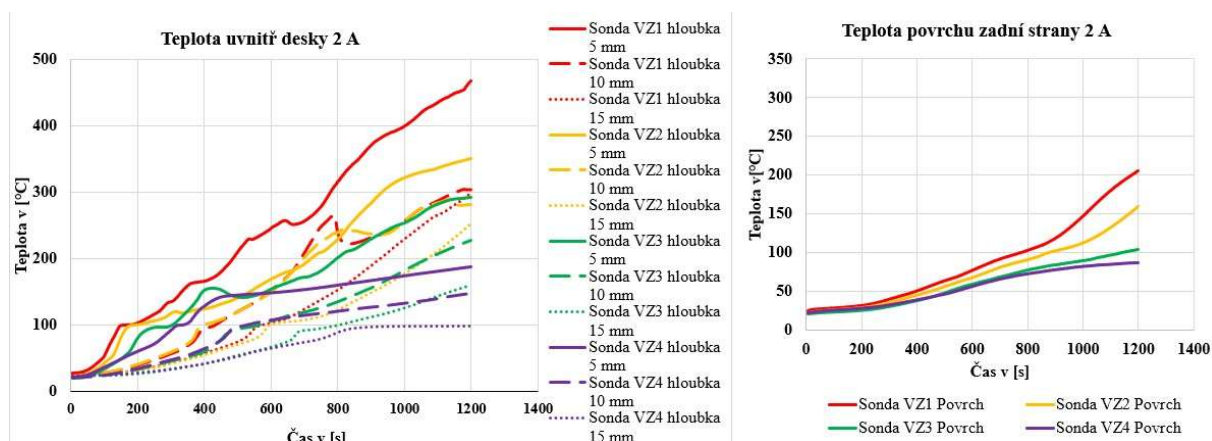
5.2.6 Syntéza výsledků termické analýzy

Výsledky ukázaly, že úprava dých v kombinaci s vhodným adhezivem ovlivňuje tepelnou odezvu překližky. Zatímco překližka **10A** vykazovala rychlejší prostup tepla do hloubky materiálu, některé modifikované varianty měly pomalejší nárůst teploty a delší dobu do dosažení teplot spojených s intenzivnějším tepelným rozkladem dřeva.

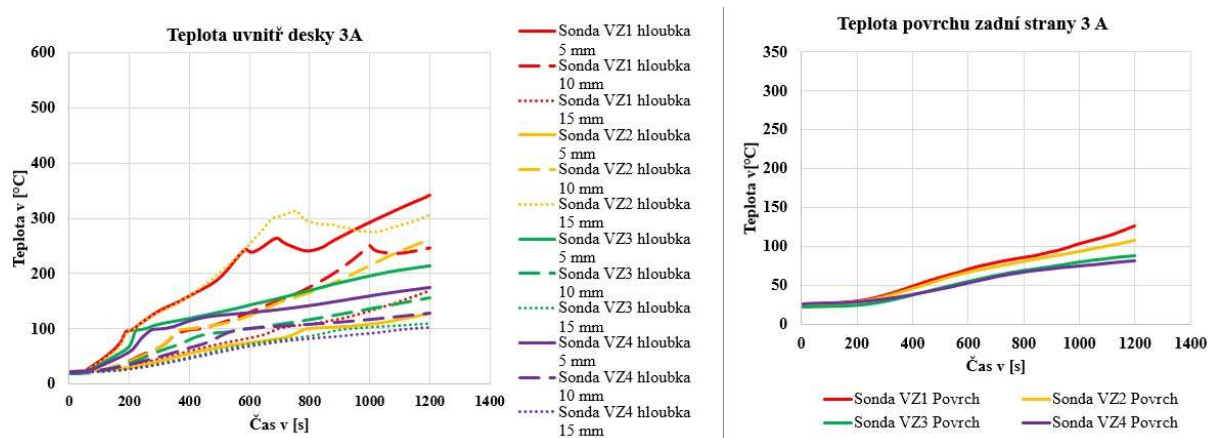
U vybraných variant, zejména **5A** a **6A**, byla v hloubce 5 mm pozorována nižší teplota než u referenčního vzorku. To naznačuje lepší ochranu vnitřních vrstev před tepelným rozkladem. Tento účinek může být důležitý také z hlediska následného zachování reziduálních mechanických vlastností po požární expozici.



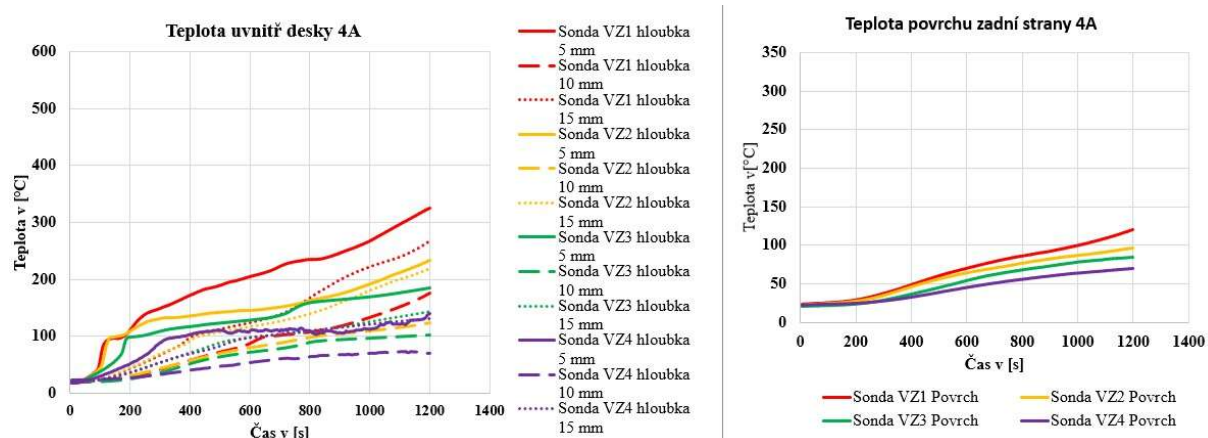
Obr. 27 Vývoj teploty u vzorku A1



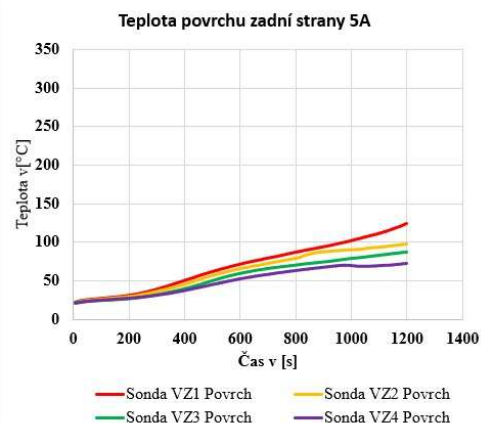
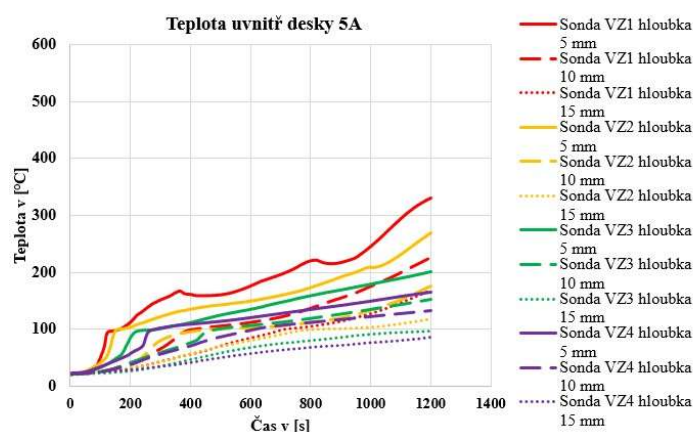
Obr. 28 Vývoj teploty u vzorku A2



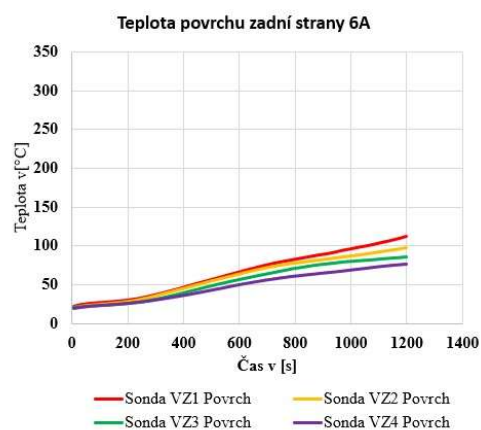
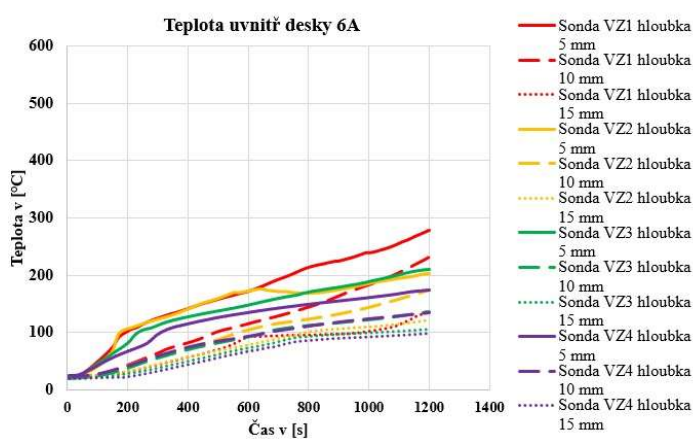
Obr. 28 Vývoj teploty u vzorku A3



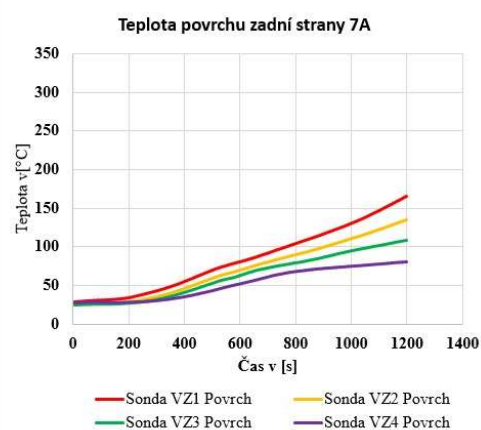
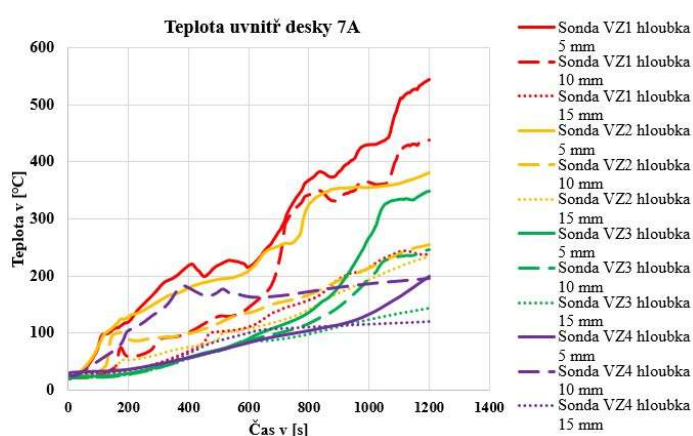
Obr. 29 Vývoj teploty u vzorku A4



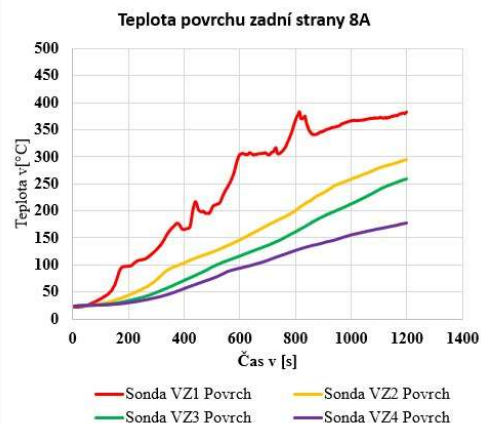
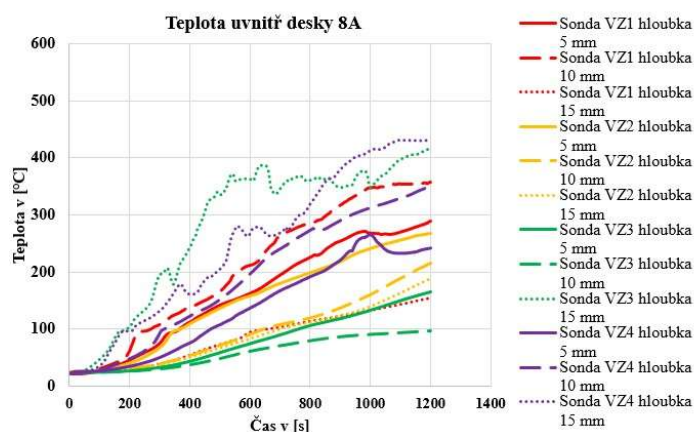
Obr. 30 Vývoj teploty u vzorku A5



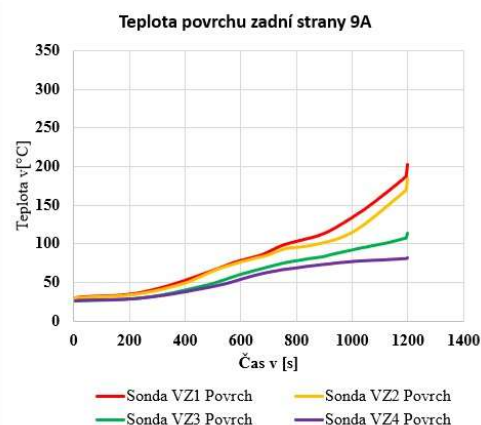
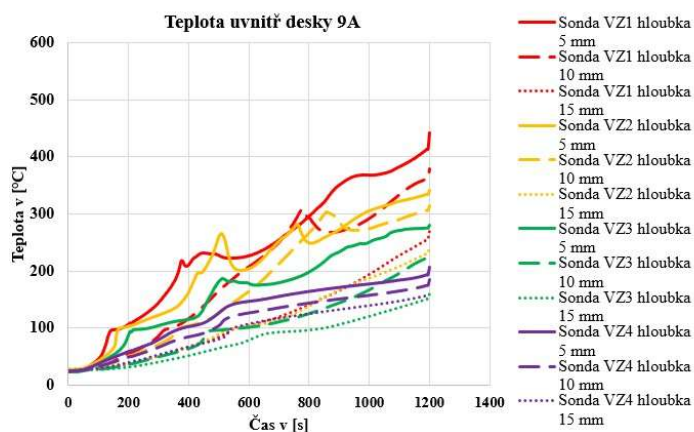
Obr. 31 Vývoj teploty u vzorku A6



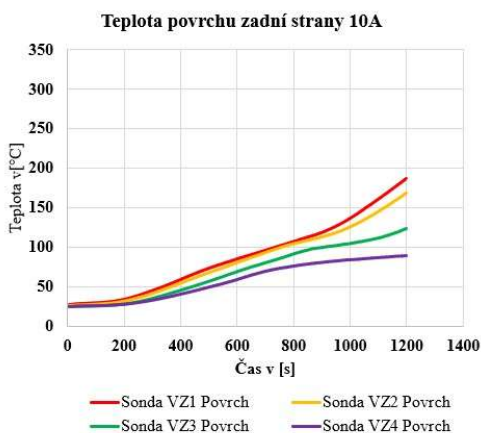
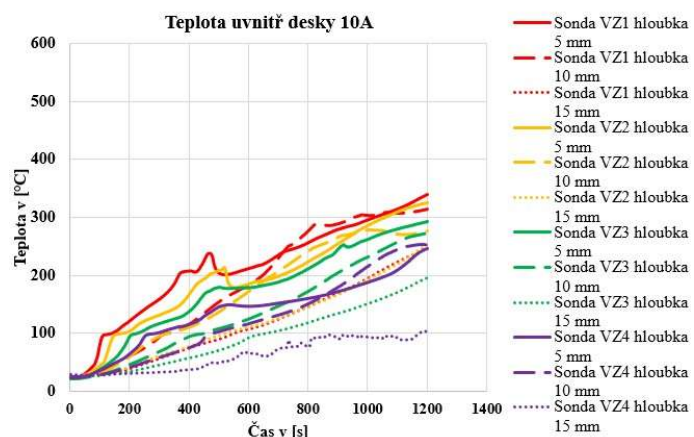
Obr. 32 Vývoj teploty u vzorku A7



Obr. 33 Vývoj teploty u vzorku A8



Obr. 34 Vývoj teploty u vzorku A9



Obr. 35 Vývoj teploty u vzorku A10

5.3 Vyhodnocení reziduální mechanických vlastností

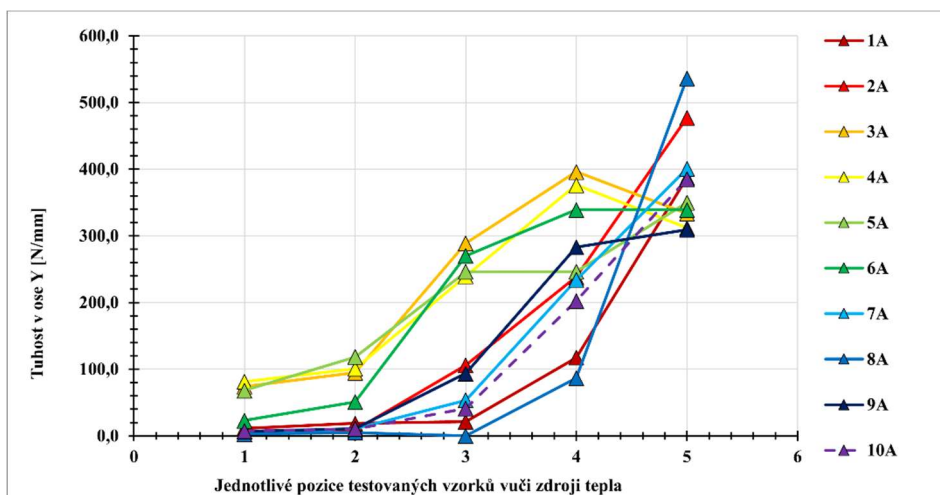
Následující vyhodnocení interpretuje reziduální mechanickou pevnost vzorků extrahovaných po zkoušce laterálního šíření plamene po svislé ploše. Předložená data popisují korelaci mezi termickou degradací a mechanickou odezvou materiálu v poli působícího teplotního gradientu. Díky tomu bylo možné porovnat materiál z nejvíce tepelně zatížené oblasti s částmi, které byly ovlivněny méně, případně sloužily jako referenční nepoškozený stav.

Výsledky poskytují podklad pro posouzení schopnosti jednotlivých úprav zachovat mechanickou funkci materiálu po požární expozici. Důraz byl kladen především na reziduální tuhost, zdánlivý modul pružnosti v ohybu a maximální dosaženou sílu při tříbodovém ohybu.

5.3.1 Reziduální tuhost v ose y

Graf 16 znázorňuje vývoj reziduální tuhosti v ose y [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$] v závislosti na poloze vzorku vůči zdroji tepelného toku. Pozice 1 reprezentuje zónu s nejvyšší intenzitou termické degradace, zatímco pozice 5 odpovídá části materiálu, která nebyla přímo ovlivněna teplotním polem a slouží jako referenční stav.

Na základě morfologie naměřených křivek lze testované varianty klasifikovat do tří charakteristických skupin:



Graf 11 Tuhost v ose y.

Skupina s vyšší reziduální tuhostí (např. 3A, 4A, 5A)

Tyto varianty vykazují výraznou reziduální tuhost již v pozici 1, tedy v oblasti nejvyššího tepelného zatížení. To naznačuje lepší zachování vnitřní soudržnosti materiálu po požární expozici. Od pozice 2 vykazují strmý nárůst tuhosti, který v pozicích 3 a 4 překonává i hodnoty nepoškozeného referenčního standardu.

Skupina se standardním průběhem degradace (např. 6A, 9A, 10A)

Vyazuje plynulý pokles mechanických vlastností směrem k tepelnému zdroji, což odpovídá standardnímu modelu zuhelnatění a pyrolýzy dřevní hmoty bez výrazné synergie s modifikátory.

Skupina s výrazným poklesem tuhosti (např. 1A, 8A)

Varianty v této skupině vykazují kritický propad tuhosti, který přetrvává až do pozice 4. Zejména u vzorku **8A** s PUR adhezivem je patrná téměř úplná ztráta nosné funkce v pozicích 1–3, což koreluje s dříve identifikovanou delaminací dýh a nízkou termickou stabilitou polymerní matrice.

5.3.2 Fenomén lokálního zpevnění v teplotně ovlivněné zóně

Pozoruhodným jevem je nárůst tuhosti v pozici 4 u vzorků první skupiny, kde naměřené hodnoty převyšují tuhost nezasaženého materiálu v pozici 5. Tento nárůst lze interpretovat jako možný důsledek dodatečné polykondenzace, respektive post-curingu, fenol-formaldehydové pryskyřice.

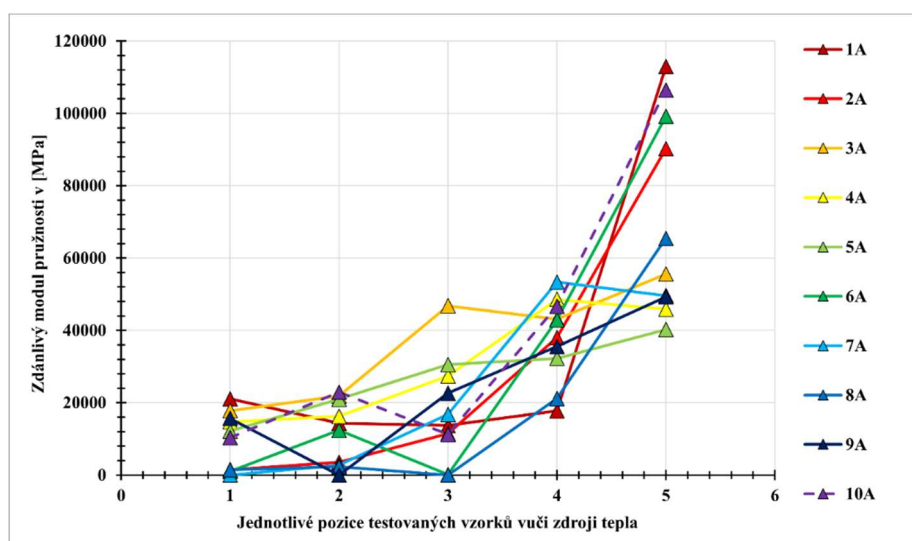
V teplotním intervalu 150–200 °C dochází vlivem prostupujícího teplotního gradientu k dodatečnému dosítování polymerní matrice. Je pravděpodobné, že přítomná retardační činidla, zejména na bázi černého louhu a alkalických solí, mohou v této zóně podporovat zvýšení hustoty síťování a zlepšení soudržnosti mezi pryskyřicí a lignocelulózovou složkou.

Výsledkem může být vytvoření zpevněné přechodové zóny, která vykazuje vyšší mechanickou rezistenci než původní modifikovaný materiál před expozicí.

5.3.3 Zdánlivý modul pružnosti v ohybu

Graf 12 znázorňuje průběh zdánlivého modulu pružnosti v ohybu v závislosti na stupni progresivní termické degradace, vyjádřené expozičními pozicemi 1–4. Na základě počáteční tuhosti referenčních vzorků a kinetiky jejich následného poklesu mechanických vlastností lze sledované materiálové konfigurace rozdělit do dvou charakteristických skupin:

Skupina 1 – konfigurace s vysokou počáteční tuhostí



Graf 12 Zdánlivý modul pružnosti v ohybu.

Tato skupina vykazuje vysoké referenční hodnoty zdánlivého modulu pružnosti v intervalu 9 000–12 000 MPa. Průběh degradace má však výrazně nelineární charakter. Zatímco do pozice 3 si vzorky udržují zvýšenou tuhost, na expoziční pozici 4 nastává výrazný pokles mechanických vlastností až na úroveň druhé skupiny. S progresí k nejvyššímu stupni termické expozice pak hodnoty zdánlivého modulu výrazně klesají k velmi nízkým hodnotám.

Skupina 2 – konfigurace s pozvolnou kinetikou degradace

Výchozí referenční hodnoty této skupiny jsou nižší a pohybují se v rozmezí 4 000–7 000 MPa. Degradací trend v jednotlivých bodech měření je však velmi pozvolný a lineárnější. Specifické modifikace, zejména varianta **3A**, si i na pozici 3 uchovávají tuhost téměř identickou s referenčním vzorkem své skupiny.

Významným znakem všech variant druhé skupiny je, že na expoziční pozici 1 si zachovávají zbytkový modul pružnosti v mezích 1 000–2 000 MPa, což naznačuje zachování části mechanické funkce i po výrazném tepelném zatížení.

Získaná data ukazují, že zatímco skupina 1 nabízí vyšší počáteční únosnost za normálních podmínek, skupina 2 vykazuje výrazně vyšší materiálovou stabilitu a rovnoměrnější průběh mechanického chování při tepelném zatížení.

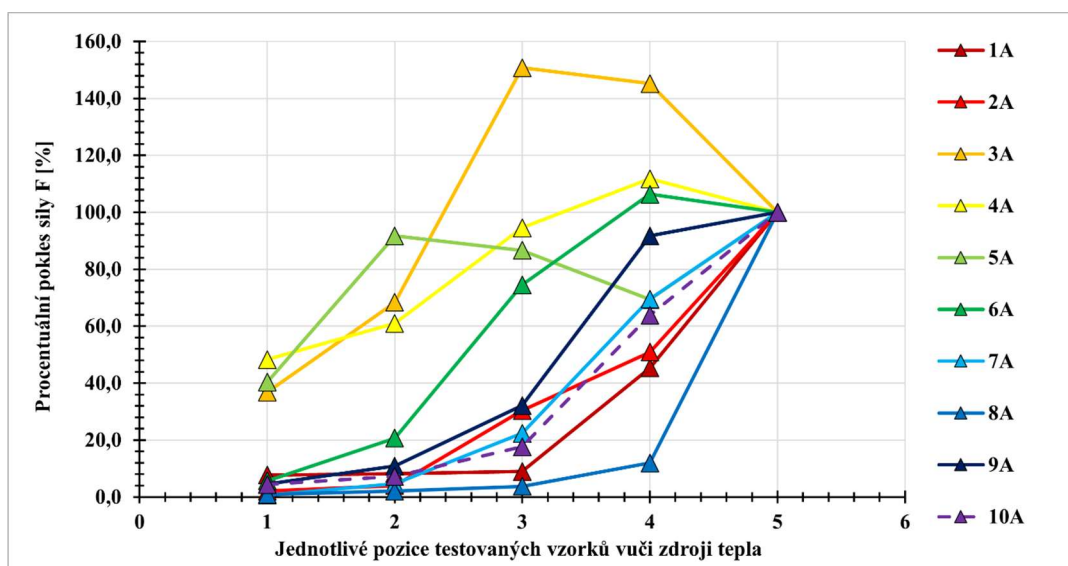
5.3.4 Relativní změna zbytkové únosnosti v ohybu

Graf 13 dokumentuje relativní změnu zbytkové únosnosti v ohybu, vyjádřenou jako procentuální podíl maximální ohybové síly F vůči tepelně neovlivněnému standardu na expoziční pozici 5, definovanému jako 100 %, při sálavém tepelném toku $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Výraznou materiálovou stabilitu vykazuje varianta 3, u níž dochází na pozicích 4 a 3 k nárůstu zbytkové únosnosti, která překonává neovlivněnou referenci o 40–50 %. Tento jev lze interpretovat jako možný důsledek distálního teplotního gradientu v průřezu materiálu, který mohl indukovat chemickou aktivaci obsažených retardérů hoření a následný post-curing, tedy dodatečné polykondenzační síťování, na rozhraní adhezivního systému a dýhových vrstev.

Na expoziční pozici 2 klesá únosnost této konfigurace na 70 % a na nejvíce degradované pozici 1 si materiál stále uchovává přibližně 40 % původní pevnosti.

Odlišné chování představuje varianta **8**, využívající jednosložkové polyuretanové adhezivum 1K PUR KESTOPUR 1010. Již na expoziční pozici 4 dochází k výraznému narušení rozhraní mezi dýhovými vrstvami a poklesu únosnosti o 90 %, přičemž reziduální pevnost činí pouze 10 % hodnoty tepelně neovlivněného standardu. Raná tepelná degradace PUR lepidla a doprovodná okamžitá delaminace dýhových vrstev naznačují méně příznivé chování této varianty při požární expoziaci ve srovnání s ostatními sledovanými systémy.



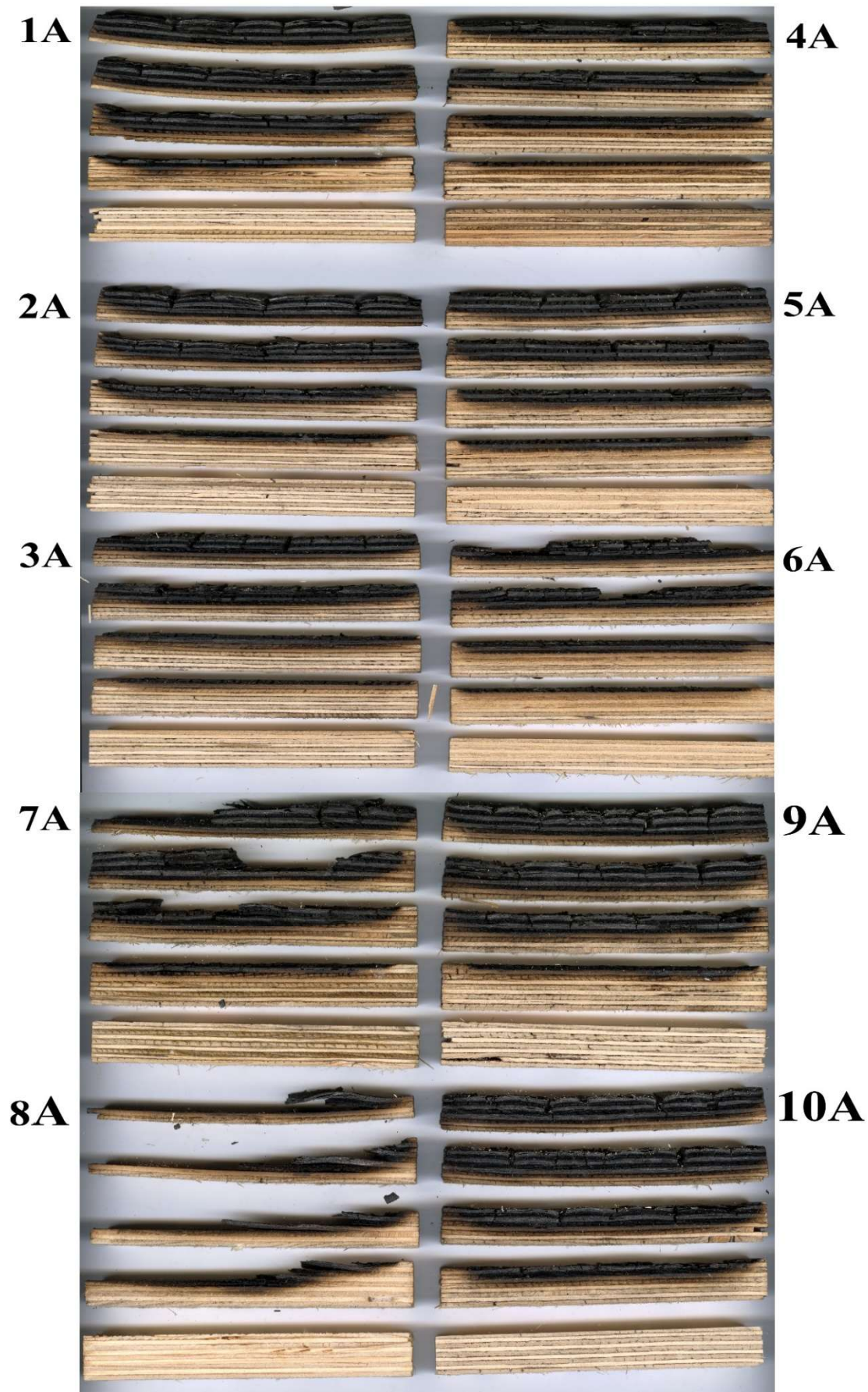
Graf 13 Procentuální pokles síly.

5.3.5 Vizualní hodnocení zuhelnatění a vztah k mechanické odezvě

Obrázek 37 znázorňuje rozsah pyrolýzy, hloubku zuhelnatělé vrstvy a její strukturní homogenitu. Komparace referenční varianty **10** s modifikovanou variantou **4** odhaluje výrazné rozdíly v integritě a trhlinové makrostruktuře zuhelnatělé zóny.

Klíčovým materiálově-inženýrským zjištěním je, že vizuální hloubka prostupu zuhelnatělé fronty nekoreluje lineárně s poklesem mechanické pevnosti materiálu. U modifikovaných variant totiž teplotní gradient mohl ovlivnit vlastnosti lepicí vrstvy i soudržnost mezi jednotlivými dýhovými vrstvami.

Makroskopická vizuální analýza stupně zuhelnatění je proto pro samostatnou predikci nebo odhad zbytkové únosnosti nepostačující a musí být doplněna mechanickým testováním a analýzou teplotního profilu.



Obr. 36 Míra tepelné degradace těles určených na reziduální pevnost

5.4 Vyhodnocení zkoušky na kónickém kalorimetru

Stanovení požárně-technických charakteristik pomocí kónického kalorimetru dle normy ČSN EN ISO 5660-1 představuje základní a standardizovanou metodu pro kvantifikaci reakce materiálů na oheň. Testování poskytuje multidimenzionální soubor dat popisujících chování vzorku při expozici konstantnímu incidentnímu tepelnému toku o intenzitě $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Přestože primární výstupy nabízejí detailní popis děje hoření, jejich přímá interpretace u materiálů modifikovaných retardéry naráží na limity vizuálního hodnocení a inherentní subjektivitu při srovnávání průběhů křivek *HRR* (*Heat Release Rate*) či *ARHE* (*Average Rate of Heat Emission*).

Samotné porovnání izolovaných maxim nebo jednotlivých hodnot uvolněného tepla proto nemusí vždy dostatečně vystihovat celkový průběh zkoušky. Hoření je nelineární, vysoce komplexní proces, v němž dominantní roli hraje časová dynamika. Z hlediska požární bezpečnosti je zásadní rozlišení mezi materiály se srovnatelným celkovým uvolněným teplem, které se však liší rychlostí jeho generování.

Materiály s nízkou kinetikou hoření, které uvolňují energii postupně, jsou z hlediska požární bezpečnosti výhodnější, neboť přímo korelují s prodloužením času dostupného pro evakuaci osob a intervenci jednotek požární ochrany.

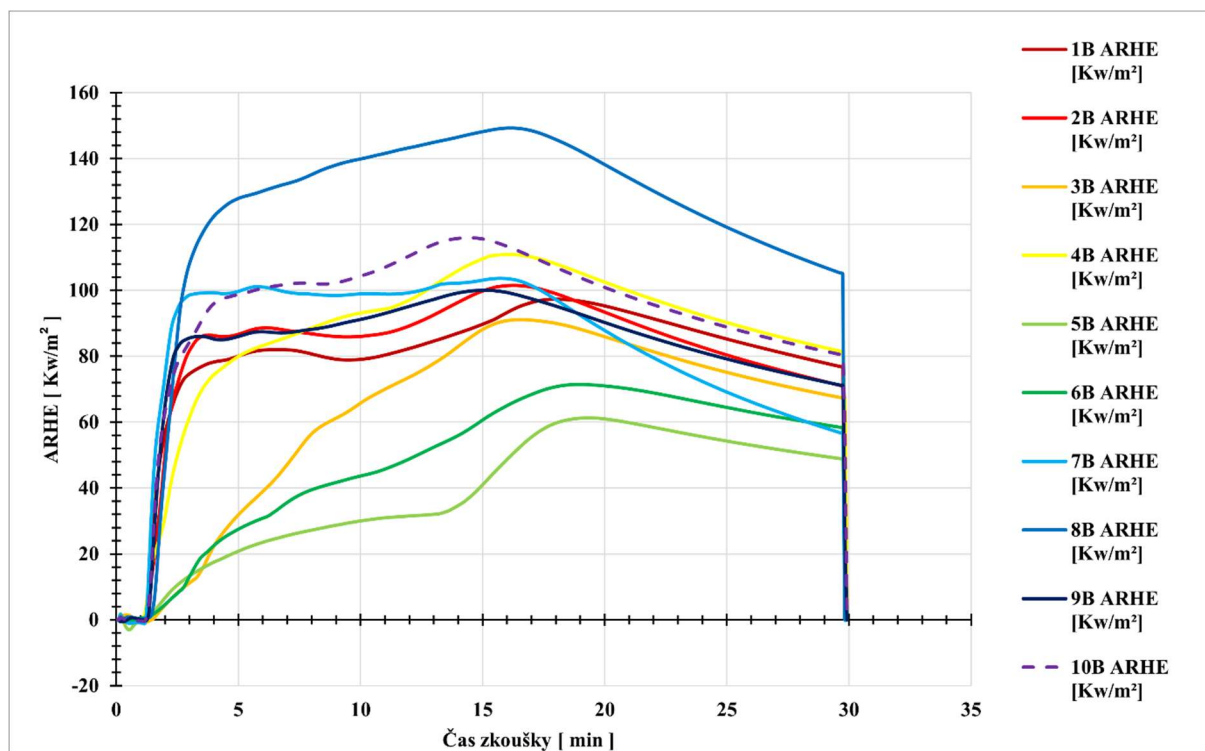
Cílem této kapitoly je proto porovnání testovaných materiálů prostřednictvím analýzy kinetiky a principů hoření. Interpretace se zaměřuje na transformaci primárních dat z kónického kalorimetru do komplexních indikátorů, které umožňují kvantitativně popsat vliv jednotlivých retardačních systémů na přechod mezi fázemi iniciace a soudržného hoření.

Komparace založená na *ARHE* vykazuje vyšší objektivitu než okamžité *HRR*, které je zatíženo šumem a stochastickými jevy, jako je praskání zuhelnatělé vrstvy či inherentní nehomogenita dřeva. Integrální charakter *ARHE* tyto fluktuace efektivně vyhlazuje, čímž eliminuje nereprezentativní maxima a zvyšuje reprodukovatelnost dat.

Tento způsob vyhodnocení proto poskytuje stabilnější základ pro srovnání energetické odezvy jednotlivých materiálů a pro posouzení vlivu použitých úprav na průběh hoření.

5.4.1 Časový průběh *ARHE* a fáze termické degradace

Graf 14 znázorňuje časový průběh průměrné rychlosti uvolňování tepla *ARHE* [$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$] pro testovaný soubor deseti variant překližovaných materiálů **1B** až **10B**. Vzorek označený jako **10B** (fialová přerušovaná čára) reprezentuje referenční variantu. Na základě kinetiky *ARHE* lze proces termické degradace hierarchicky rozdělit do čtyř specifických fází, které reflektují materiálovou odezvu na incidentní tepelný tok $50 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$.



Graf 14 Průběh *ARHE* (Average Rate of Heat Emission) u sledovaných vzorků.

1. Fáze indukce a termické akumulace, 0–2 min

Počáteční perioda je charakterizována endotermní absorpcí sálavého tepla. Dochází k akumulaci energie v povrchových vrstvách, odparu vlhkosti a iniciaci primárního rozkladu polymerních složek dřeva, zakončené vizuálním zapálením vzorku.

2. Fáze rapidní lineární propagace, přibližně 2–3 min

Bezprostředně po zapálení dochází k prudkému nárůstu *ARHE*, který souvisí se zvýšeným uvolňováním těkavých produktů pyrolýzy z povrchu materiálu. Tato fáze má u většiny vzorků téměř lineární charakter, neboť tepelný rozklad povrchových vrstev probíhá

ještě před plným rozvinutím ochranné zuhelnatělé vrstvy. Rychlost uvolňování tepla v tomto úseku proto dobře popisuje počáteční energetickou odezvu materiálu.

3. Fáze nelineární saturace a tvorby bariéry

V tomto úseku se původně lineární charakter křivek mění. Dochází k jejich zploštění a postupnému zpomalení tempa uvolňování tepla. Tento jev souvisí s tvorbou zuhelnatělého zbytku, který začíná působit jako fyzikální a tepelná bariéra. Vznikající zuhelnatělá vrstva omezuje uvolňování hořlavých produktů z hlubších vrstev k plameni a zároveň snižuje přestup tepla do dosud méně poškozeného materiálu.

4. Fáze vrcholové emise a terminálního dohořívání

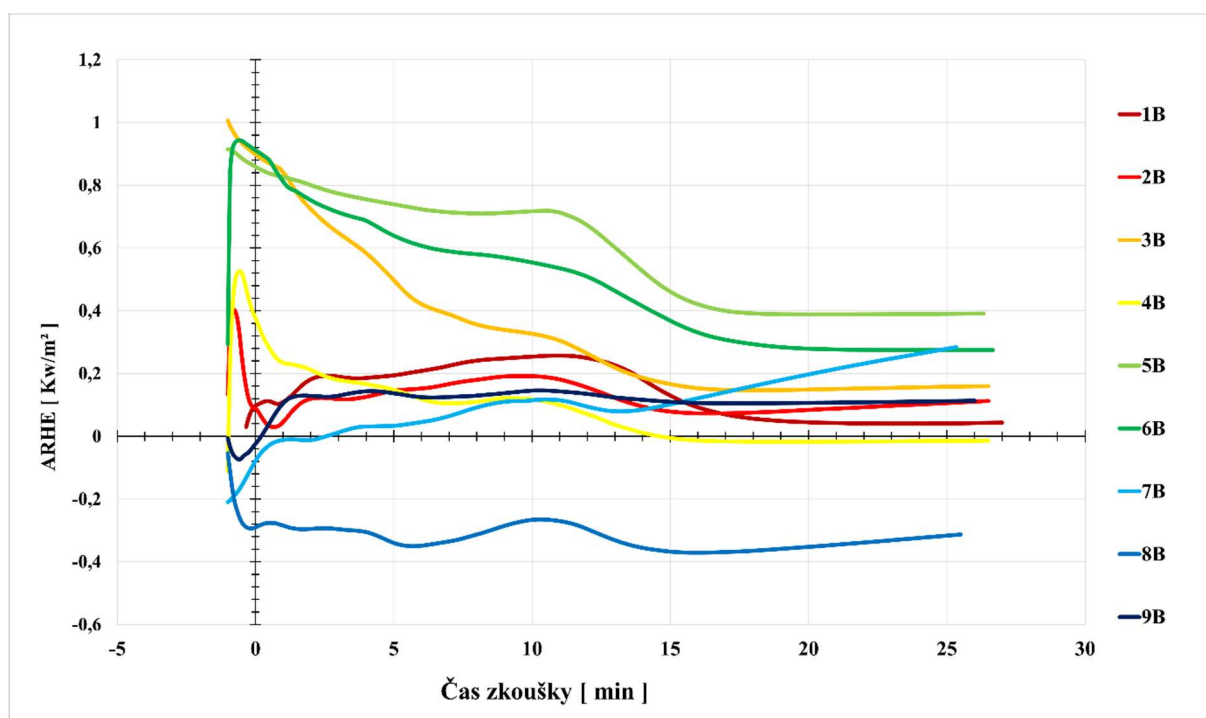
Křivky dosahují svých absolutních maxim v momentě, kdy je uvolňování tepla nejintenzivnější. Tento stav může souviset s postupnou aktivací většího objemu materiálu, porušením zuhelnatělé vrstvy nebo s vyčerpáním ochranného účinku povrchové bariéry. Následný pokles hodnot ARHE ukazuje na postupné vyčerpávání hořlavého podílu materiálu a přechod do fáze dohořívání.

Z komparativního hlediska jsou dominantní varianty **3B**, **5B** a **6B**, které vykazují výrazné potlačení kinetiky již ve druhé fázi, tedy mírnější sklon lineárního nárůstu, a velmi časný nástup saturační fáze. To potvrzuje, že přidaná retardační činidla katalyzují tvorbu zuhelnatělé vrstvy dříve a efektivněji než u referenčního vzorku **10B**.

5.4.2 Relativní útlum tepelné emise RRF

Pro kvantitativní posouzení těchto rozdílů a eliminaci subjektivního hodnocení vizuálních průběhů byla využita metoda výpočtu relativního útlumu tepelné emise vůči referenci, označená jako Relative Reduction Factor (*RRF*). Obecná rovnice pro výpočet relativního útlumu *ARHE* vzorku *i* v čase *t* je:

$$RRF_i = 1 - \frac{ARHE_i(t)}{ARHE_{10}(t)} \quad (19)$$



Graf 15 Znáznorněná účinnost retardéru v jednotlivých variantách k vývoji ARHE.

Tento relativní ukazatel umožňuje sledovat, jak se účinnost jednotlivých retardérů mění v čase a ve které z výše definovaných fází hoření dosahují své maximální funkčnosti.

Pro posouzení vlivu modifikace na požární stabilitu byla data transformována do formy relativní retardační účinnosti, uvedené na Obr. 12. V tomto zobrazení představuje osa úseček $x = 0$ časový okamžik vznícení referenčního vzorku **10B**. Hodnoty v záporné doméně osy x tak popisují chování materiálu v indukční fázi před zapálením reference, zatímco kladné hodnoty korelují s rozvinutým požárem.

Osa y kvantifikuje míru potlačení tepelné emise (RRF); kladné hodnoty indikují retardační zisk, zatímco záporné hodnoty značí prodegradační, případně prohořlavý účinek modifikace, tedy navýšení tepelného toku oproti referenci.

5.4.2.1 Analýza kritických materiálových odezev

Negativní vliv polymerní matrice, vzorek 8B

Varianta **8B**, využívající polyuretanové lepidlo, vykazuje v celém průběhu testu negativní hodnoty účinnosti ($RRF < 0$). Tento jev naznačuje, že inherentní hořlavost

polyuretanové složky a její vysoká výhřevnost převažují nad případnými retardačními účinky systému. Dochází k intenzivnímu uvolňování těkavých hořlavých plynů, které zvyšují celkový tepelný výkon nad úroveň nativního dřeva.

Teplotně závislá aktivace, vzorek 7B

Křivka vzorku **7B** vykazuje v iniciační fázi, tedy kolem bodu $x = 0$, negativní účinnost, avšak s rostoucí teplotou se trend obrací do pozitivních hodnot. Tento průběh může souviset s mechanismem teplotní aktivací alkalických složek. V počáteční fázi může systém přispívat spíše k přenosu tepla, zatímco po dosažení vyšší teploty se může více projevit podpora dehydratačních reakcí a tvorba ochranné zuhelnatělé vrstvy. To následně vede k poklesu tepelné emise oproti referenci.

Dočasná inhibice v plynné fázi, vzorek 4B

Vzorek **4B** vykazuje rychlý nástup účinnosti v prvních minutách expozice, což může ukazovat na výraznější retardaci v počáteční fázi. Tento efekt může souviset s uvolňováním nehořlavých nebo méně hořlavých plynných produktů, případně s rychlou tvorbou povrchové ochranné vrstvy. S postupem času však účinnost klesá k nule. Tento jev lze interpretovat jako postupné vyčerpání aktivní složky nebo snížení účinnosti vytvořené bariéry, kdy se materiál začíná přibližovat energetickému profilu referenční varianty.

Maximální synergie a stabilizace, vzorek 3B

Varianta **3B**, představující kombinaci černého louhu a dicyandiamidu, vykazuje nejefektivnější systém s účinností blízkou hodnotě 1,0, tedy téměř 100% snížení tepelné emise oproti referenci v daném čase.

Tento výsledek může souviset se současným působením ligninové složky černého louhu, alkalických složek a dusíkatých struktur. Již od počátku expozice pravděpodobně dochází k formování kompaktní zuhelnatělé vrstvy, která po 15. minutě přechází do stabilního režimu, kdy je tepelná emise kontinuálně bržděna bez výrazných známek degradace bariéry.

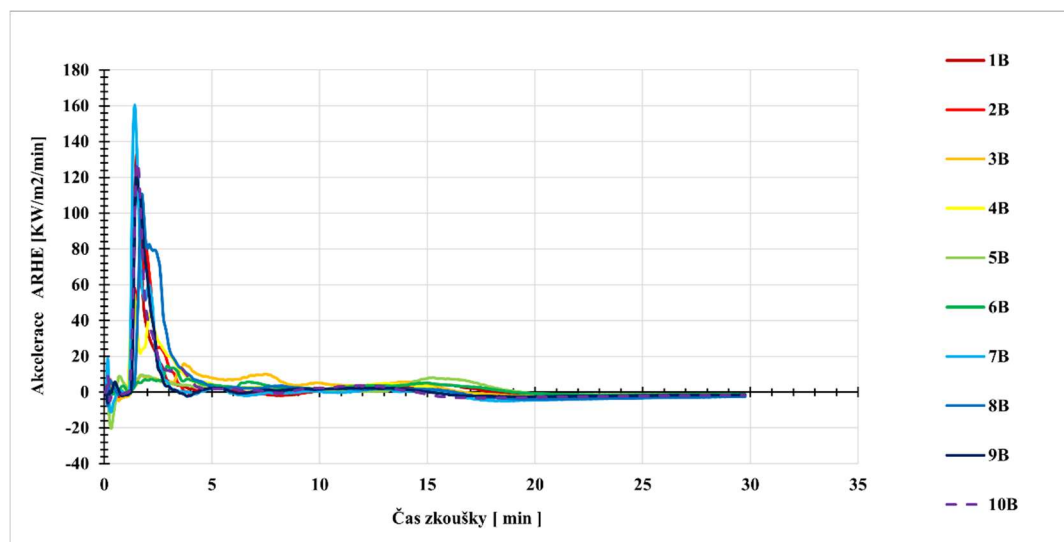
Dvoufázový mechanismus, vzorek 5B

U vzorku **5B** lze pozorovat zřetelný dvoufázový průběh účinnosti. První fáze, přibližně do 10. minuty, je pravděpodobně spojena s počáteční karbonizací a tvorbou ochranné vrstvy. Následný mírný pokles účinnosti může ukazovat částečnou změnu struktury charu nebo na dočasné oslabení její bariérové funkce.

V další fázi se účinnost opět stabilizuje. Tento průběh může souviset s přechodem od počáteční organické ochranné vrstvy k stabilnějšímu anorganicko-uhlíkatému zbytku, na jehož tvorbě se mohou podílet zejména alkalické složky přítomné v systému. Tyto složky mohou částečně převzít bariérovou funkci po rozkladu primárních organických podílů.

5.4.3 První derivace *ARHE* a identifikace fázových přechodů

Pro identifikaci fázových přechodů během termické degradace byla využita první časová derivace parametru *ARHE*, která vyjadřuje akceleraci uvolňování tepla $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$. Tato funkce, uvedená v grafu 16, slouží jako indikátor reaktivity systému a umožňuje lokalizovat okamžiky nejprudších změn v kinetice hoření.



Graf 16 Akcelerace *ARHE*.

5.4.3.1 Matematická validace a limitace metody

Z hlediska numerického zpracování je nezbytné vzít v úvahu, že proces diferenciací je citlivý na poměr signálu k šumu v primárních datech. Jelikož derivování působí jako vysokofrekvenční filtr, i drobné stochastické fluktuace v měření, způsobené například

turbulencí v odtahu nebo lokálními nehomogenitami vzorku, mohou být v derivované funkci výraznější.

Tyto lokální odchylky je třeba interpretovat opatrně. Při vyhodnocení byl kladen důraz především na celkový průběh křivky a na výrazné extrémy, které korelují s fyzikálními ději během hoření:

$$a_{ARHE}(t) = \frac{d(ARHE)}{dt} \approx \frac{ARHE_n - ARHE_{n-1}}{\Delta t} \quad (20)$$

5.4.3.2 Interpretace kinetických extrémů

Primární kinetický puls, iniciační fáze

Graf jasně identifikuje nejvyšší hodnotu rychlosti změny ARHE v první fázi testu, přibližně kolem 2. minuty. Tento puls odpovídá okamžiku vzplanutí povrchové vrstvy a následnému neomezenému šíření plamene.

Zde jsou patrné největší rozdíly mezi variantami: zatímco referenční a méně upravené vzorky, například **7B**, vykazují intenzivní nárůst až k hodnotám nad $120 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, u vysoce účinných systémů, zejména **3B** a **5B**, je tato akcelerace potlačena na zlomek těchto hodnot.

Stacionární fáze, 5–15 min

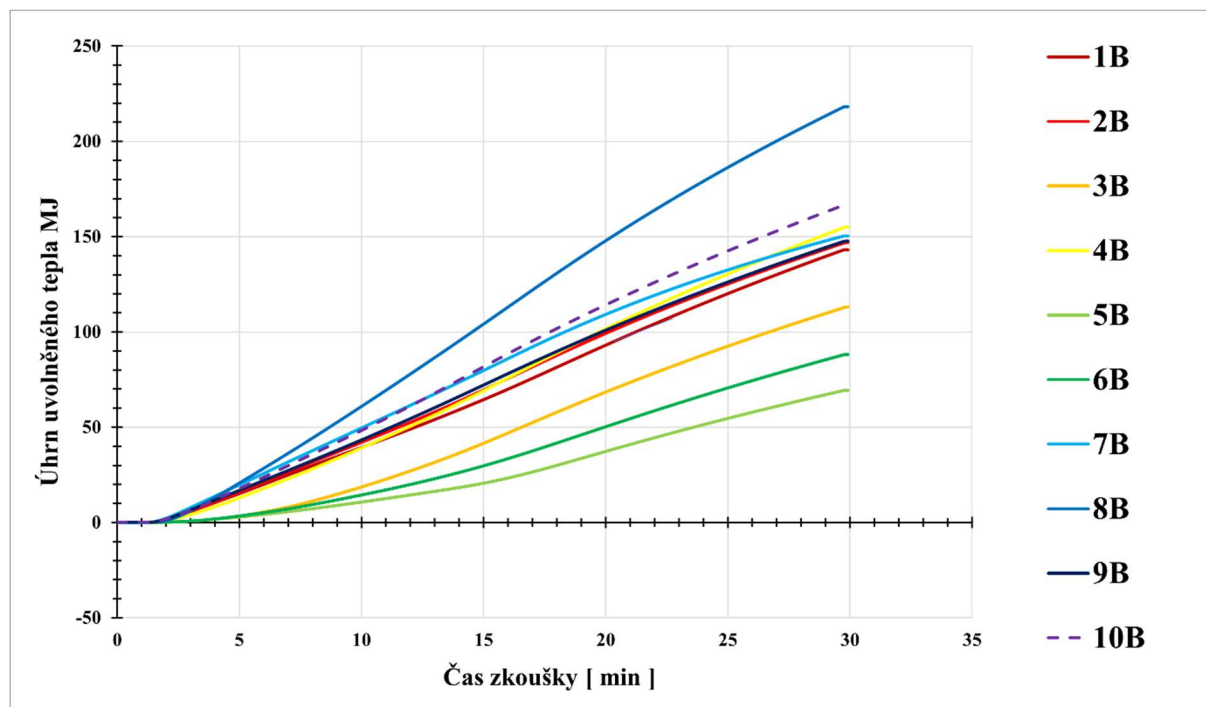
Po odeznění iniciačního pulsu se rychlost změny ARHE u všech vzorků blíží nule, což indikuje stabilizovaný, přibližně lineární průběh hoření pod kontrolou vznikajícího zuhelnatělého zbytku.

Sekundární termická aktivace, 15–20 min

V tomto intervalu lze pozorovat mírný nárůst rychlosti změn ARHE u vybraných vzorků. Tento jev indikuje strukturní transformaci bariéry nebo prohoření do hlubších vrstev materiálu, kde dochází k nové aktivaci pyrolýzních plynů. Právě zde se projevuje sekundární retardační fáze některých retardačních systémů, například u varianty **5B**, jež tuto sekundární akceleraci dokáže brzdit.

Terminální fáze, nad 20 min

Po 20. minutě se hodnoty rychlosti změny ARHE u všech variant sjednocují a klesají do záporných hodnot, což značí definitivní vyčerpání hořlavého substrátu a přechod do fáze dohořívání popelového rezidua.



Graf 17 Úhrn uvolněného tepla (THR).

5.4.4 Celkově uvolněné teplo *THR*

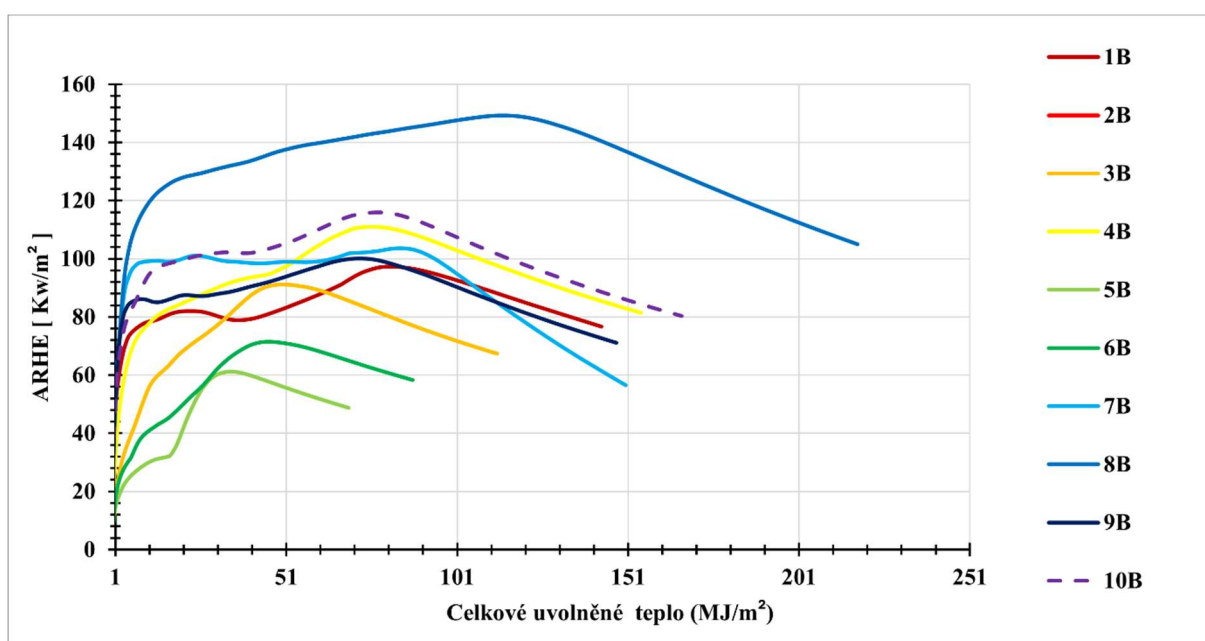
Parametr THR (*Total Heat Released*), uvedený v Grafu 17, je definovaný jako časový integrál rychlosti uvolňování tepla a kvantifikuje celkové požární zatížení materiálu:

$$THR(t) = \int_0^t q(t) dt \quad (21)$$

Z naměřených dat vyplývá, že aplikace retardérů efektivně snižuje energetickou bilanci většiny variant vůči referenční variantě **10B**. Výrazné odlišné chování představuje vzorek **8B** s emisí přesahující 200 MJ. Tento negativní trend je způsoben nízkou termickou stabilitou a vysokou měrnou výhřevností polyuretanové matrice, která v systému slouží jako doplňkový zdroj paliva.

U tohoto vzorku dochází k předčasné delaminaci dýhových vrstev, čímž se radikálně zvětšuje specifický povrch vystavený tepelnému toku a usnadňuje difuze kyslíku do vnitřní struktury materiálu. Výsledné intenzivní objemové hoření výrazně omezuje bariérový efekt zuhelnatělé vrstvy.

Naopak varianty **5B** a **6B** dosahují redukce *THR* o více než 50 %, přičemž hodnoty se pohybují přibližně v rozmezí (70 – 90 MJ. Tento výsledek potvrzuje vysokou účinnost zvolené modifikace při fixaci uhlíku v pevné fázi a potlačení transformace substrátu na tepelnou energii.



Graf 18 Fázový portrét ARHE v závislosti THR.

5.4.5 Fázový portrét hoření ARHE–THR

Graf 18 představuje fázový portrét průběhu hoření, vyjadřující korelaci mezi průměrnou rychlostí uvolňování tepla (*ARHE*) a celkově uvolněným teplem (*THR*). Toto zobrazení eliminuje vliv absolutního času a umožňuje sledovat, jak se intenzita hoření mění v závislosti na postupném nárůstu celkově uvolněné energie.

Strmost a výška jednotlivých trajektorií ukazují, jak rychle se při rostoucím *THR* zvyšuje energetická odezva materiálu. Vyšší hodnoty *ARHE* při stejném *THR* odpovídají intenzivnějšímu průběhu hoření, zatímco nižší hodnoty ukazují na pozvolnější uvolňování tepla.

Z fázového portrétnu lze testované soubory klasifikovat do tří skupin dle jejich termodynamického chování.

5.4.5.1 Klasifikace materiálových systémů podle fázového portréту

Pro-pyrolýzní systémy, vzorek 8B)

Trajektorie vzorku **8B** vykazuje výrazný nárůst výkonu již při minimální spotřebě paliva a dosahuje nejvyšších hodnot v obou sledovaných parametrech. Tento průběh potvrzuje výrazný vliv nestabilní polyuretanové matrice, která zvyšuje energetický příspěvek materiálu v průběhu zkoušky.

Konzervativní retardace, vzorek 4B a reference 10B

Tato skupina sleduje běžný trend hoření lignocelulózových materiálů. Křivka vzorku **4B** přibližně kopíruje trajektorii referenční varianty **10B**, avšak je posunuta k nižším hodnotám tepelné emise. Účinek úpravy se zde projevuje především snížením intenzity hoření, nikoli zásadní změnou celkového průběhu.

Systémy s modifikovanou kinetikou, vzorky 3B, 5B a 6B

Tyto varianty vykazují výrazně odlišný fázový obraz. Klíčovým znakem je potlačení iniciačního maxima a pozvolnější nárůst ARHE. Křivky stoupají k vrcholu s nižší směrnici, což naznačuje zpomalení počáteční pyrolýzy a postupnější přechod do fáze stabilizovaného hoření.

Z hlediska sledovaných parametrů vykazují tyto varianty nejpříznivější chování, protože omezují okamžitou intenzitu hoření i při postupném nárůstu celkově uvolněného tepla.

5.4.5.2 Dílčí interpretace fázového portréту

Fázový portrét ukazuje, že vysoce účinné retardéry, zejména na bázi černého louhu a dicyandiamidu, nemění pouze absolutní hodnoty, ale také průběh energetické odezvy materiálu během zkoušky. U variant **3B**, **5B** a **6B** je patrné zpomalení nárůstu ARHE a posun k méně intenzivnímu průběhu hoření.

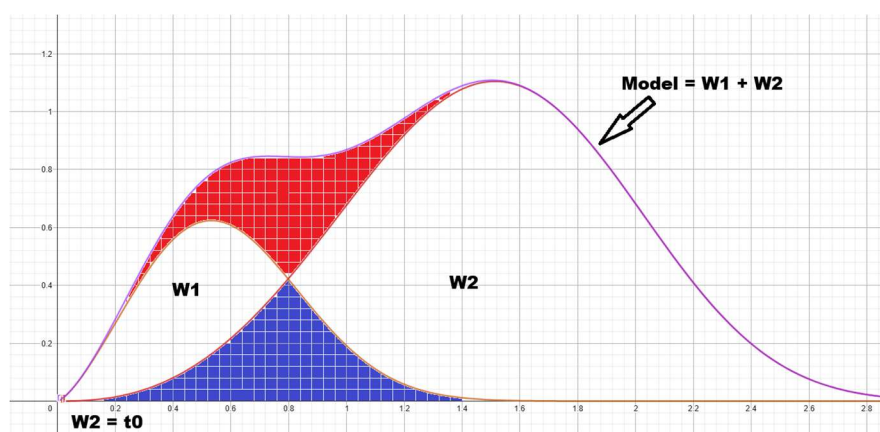
Tento průběh lze spojit s tvorbou stabilnější zuhelnatělé vrstvy a omezením uvolňování hořlavých produktů pyrolýzy.

5.4.6 Vyhodnocení *ARHE* pomocí modelu a jeho verifikace

Vzhledem k tomu, že termická degradace a následné hoření lignocelulózových materiálů představuje vysoce komplexní, vícefázový nelineární proces, je pro hlubší pochopení mechanismu účinku jednotlivých retardérů nezbytná experimentální data podrobit matematickému modelování. Cílem bylo rozdělit celkový průběh parametru *ARHE* na dílčí složky, které lze vztáhnout k jednotlivým fázím hoření.

Pro tento účel byl použit fenomenologický model založený na součtu dvou nezávislých Weibullových distribučních funkcí w_1 a w_2 . Výsledný matematický popis kinetiky uvolňování tepla byl definován jako jejich superpozice.

Regresní analýza, tedy proložení experimentálních dat, byla záměrně ohraničena fází od iniciace hoření po oblast těsně za vrcholem maximální hodnoty *MARHE*. V této zóně již dominantní procesy plamenného hoření přecházejí do difuzně řízeného žhnutí a dohořívání zuhelnatělého zbytku, které vykazují odlišnou kinetiku.



Obr. 37 Abstraktní model hoření *ARHE* s vyznačeným modrým polem překryvu a červeným polem, které znázorňuje rozdíl mezi modelem a dvěma funkcemi.

Zahrnutí této finální fáze by mohlo zhoršit kvalitu proložení v počátečních fázích rozvoje požáru. Použití složitějších funkcí s vyšším počtem volných parametrů nebylo zvoleno z důvodu rizika nadměrného přizpůsobení modelu experimentálním datům, tedy overfittingu. Takový postup by snižoval možnost srozumitelné interpretace jednotlivých parametrů.

5.4.6.1 Fyzikální interpretace komponent modelu

Navržený model verifikuje a kvantifikuje plochu pod křivkou *ARHE* rozdělením na dvě základní sub-domény, viz Obrázek 38.

Komponenta w_1 – primární povrchová fáze

Komponenta w_1 reprezentuje iniciaci a plamenné hoření povrchových vrstev materiálu. Tento děj probíhá za optimálního přísunu atmosférického kyslíku a vysokého incidentního tepelného toku. To odpovídá kinetice téměř dokonalého spalování volných pyrolýzních plynů.

Komponenta w_2 – sekundární intrakorporální fáze

Komponenta w_2 reprezentuje prohořívání vnitřních struktur kompozitu pod nově zformovanou zuhelnatělou vrstvou. Tento děj je charakteristický difuzním omezením transportu tepla i plynů.

5.4.6.2 Interakce složek modelu a časový posun

Vzájemná prostorová a časová orientace křivek w_1 a w_2 definuje klíčové charakteristiky materiálového systému. Z hlediska požárního chování je důležité zejména zpoždění nástupu druhé složky, tedy časový posun mezi počátečním hořením povrchu a následnou aktivací hlubších vrstev.

Doba latence vnitřního hoření

Model umožňuje stanovit časový posun Δt nástupu vnitřní pyrolýzy w_2 . Z hlediska požární bezpečnosti je žádoucí maximalizace tohoto parametru, tedy co nejdelší oddálení destrukce jádra materiálu za předpokladu, že povrchová vrstva w_1 již degraduje.

Interakční oblast a účinek retardéru

Geometrický prostor mezi funkcemi w_1 a w_2 , ohraničený shora celkovou obálkou modelu, definuje efektivní zónu působení retardérů hoření. Aplikovaná retardační činidla mohou ovlivňovat tvarové parametry a parametry měřítka (A_1 , A_2 , λ_1 , λ_2 , k_1 , k_2) jednotlivých Weibullových funkcí.

Účinnější úprava by měla vést ke snížení amplitudy obou funkcí a současně k většímu časovému oddělení povrchové a sekundární fáze. Menší překryv obou složek naznačuje pomalejší rozvoj hoření v celém průřezu a nižší dynamiku uvolňování tepla.

5.4.6.3 Parametrická sumarizace konstant Weibullova modelu

V Tabulce 5 je provedena komplexní parametrická sumarizace konstant obou parciálních Weibullových funkcí w_1 a w_2 . Pro zjednodušení vícekritériálního hodnocení a eliminaci matematické redundance byl zaveden kumulativní kinetický faktor intenzity x , definovaný jako přímý součin charakteristických konstant dané funkce, tedy amplitudy, parametru tvaru a parametru měřítka:

$$x = A \cdot k \cdot \lambda \quad (22)$$

Tento součin představuje zjednodušený skalární ukazatel, který v sobě kombinuje strmost nárůstu energetické emise, polohu lokálního maxima a celkové časové měřítko parciálního děje. Výsledné jediné číslo tak souhrnně kvantifikuje celkovou kinetickou mohutnost a energetickou vydatnost příslušné fáze hoření. To umožňuje objektivně porovnávat jednotlivé retardační úpravy pomocí jediného parametru, aniž by bylo nutné izolovaně interpretovat vzájemně závislé kovarianty.

Tabulka 5 Překlad konstant vyhodnocených podle modelu.

Číslo vzorku	w_1			w_2				Konstanta		Koeficient determinace R^2
	A_1	k_1	λ_1	A_2	k_2	λ_2	t_0	$A_1 \cdot k_1 \cdot \lambda_1$	$A_2 \cdot k_2 \cdot \lambda_2$	
1 B	527	1,567	0,200	2441	1,918	0,047	3,29	165	220	0,9877
2 B	513	1,731	0,219	2324	1,812	0,054	3,72	195	226	0,9882
3 B	1246	2,201	0,064	1084	1,917	0,051	11,05	176	106	0,9991
4 B	639	1,750	0,158	1747	2,319	0,065	3,89	177	263	0,9978
5 B	964	1,638	0,043	330	2,030	0,113	12,50	69	76	0,9991
6 B	727	1,946	0,071	678	2,596	0,072	8,76	101	127	0,9984
7 B	616	1,537	0,220	2008	1,869	0,061	3,27	208	231	0,9875
8 B	846	1,865	0,188	2684	1,886	0,067	4,56	297	340	0,9828
9 B	423	1,678	0,272	2426	1,629	0,054	3,38	193	212	0,9732
10 B - ref.	611	1,617	0,201	1849	2,174319	0,068	2,78	199	271	0,9921

5.4.6.4 Čas aktivace sekundární fáze t_0

Klíčovým srovnávacím parametrem z hlediska požární odolnosti jádra materiálu je čas t_0 . Tento parametr definuje odhadovaný moment aktivace sekundární funkce w_2 , tedy počátek

prohořívání vnitřních dýhových vrstev pod ochrannou zuhelnatělou bariérou. Pro potvrzení bariérového efektu byl tento čas porovnán proti referenční variantě **10B**.

Získaná data odhalují výrazné rozdíly v účinnosti testovaných systémů a poukazují na stabilizační efekt u vybraných modifikací:

Varianta 5B

Varianta **5B** vykazuje absolutně nejvyšší retardační účinnost, kdy byl zaznamenán posun nástupu vnitřní pyrolýzy o 350 %, tedy přibližně 4,5násobnému prodloužení indukční periody oproti referenčnímu vzorku.

Varianta 3B

Varianta **3B** prokazuje mimořádnou schopnost izolace vnitřních struktur s časovým posunem o 298 %.

Varianta 6B

Varianta **6B** dosahuje výrazného zpomalení transportu tepla do jádra o 215 %.

Ostatní modifikované varianty vykazují standardní, avšak stabilní posun počátku vnitřního hoření v rozmezí 10–70 %, což indikuje mírné zvýšení termické stability lepené spáry a přilehlých dýh.

Poslední sloupec tabulky uvádí koeficient determinace R^2 , který slouží jako kritérium shody modelu s experimentálními daty. Dosahované vysoké hodnoty R^2 ukazují, že zvolený dvousložkový Weibullův model dobře popisuje modelovanou část křivek *ARHE*. Potvrzují, že duální Weibullovo rozdělení s vysokou přesností kopíruje reálné kalorimetrické datové řady a dekonvoluce globálního *ARHE* na povrchové a vnitřní hoření je statisticky dobře podložena.

5.4.6.5 Procentuální zhodnocení celkového ARHE vůči referenci

Tabulka 6 uvádí součet kinetických faktorů obou parciálních funkcí, která reprezentuje celkovou energetickou bilanci uvolňovaného tepla v modelované fázi hoření. Tento parametr umožňuje procentuální porovnání celkového průběhu křivek *ARHE* mezi jednotlivými variantami modifikace a referenční variantou.

Tabulka 6 Procentuální zhodnocení celkového ARHE pomocí procentuálního vyjádření vůči 10B-ref.

Číslo vzorku	Součet konstant w_1 a w_2	Procentuální porovnání vůči 10B-ref.	Jmenovitý rozdíl v procentech - snížená hořlavost, + zvýšená hořlavost
1 B	385	82	-18
2 B	420	89	-11
3 B	282	60	-40
4 B	439	93	-7
5 B	144	31	-69
6 B	227	48	-52
7 B	439	93	-7
8 B	637	135	+35
9 B	405	86	-14
10 B - ref.	470	100	0

Z hlediska celkového snížení hořlavosti identifikoval model jako nejúčinnější následující materiálové varianty:

Variantá 5B

Variantá 5B vykazuje absolutně nejvyšší retardační efekt s celkovým poklesem parametru emise tepla o 69 % vůči referenčnímu vzorku.

Variantá 6B

Variantá **6B** představuje druhou nejúčinnější modifikaci, u které došlo v celkovém měřítku ke snížení energetického průběhu o 52 %.

Variantá 3B

Variantá **3B** potvrzuje stabilní retardační potenciál s celkovým potlačením projevů hoření o 40 %.

Naopak u varianty **8B** model ukazoval negativní retardační účinek, kdy se projevila o 35 % vyšší hořlavost ve srovnání s referenčním standardem. Tento nárůst uvolňování tepla plně koresponduje s reálnými experimentálními daty i s výsledky zkoušek laterálního šíření plamene, což potvrzuje, že navržený matematický model dokáže velmi citlivě predikovat chování kompozitu v podmínkách požáru.

Předložený model tak úspěšně generuje kvantifikovatelné parametry, kterým lze na základě morfologie křivek přiřadit konkrétní fyzikální a chemické charakteristiky studovaných retardérů. Je však nutné konstatovat, že na základě současné sady makroskopických dat nelze jednoznačně separovat, do jaké míry je validace jednoho konkrétního parametru izolovaně závislá na specifické vlastnosti použitého aditiva. Tato skutečnost definuje limity současného stavu poznání a otevírá prostor pro navazující výzkum.

Budoucí verifikace modelu si vyžádá cílenou experimentální činnost zaměřenou na izolované časové fáze termické degradace, aby bylo možné potvrdit, zda mikrostrukturní děje v reálném čase odpovídají teoretickým predikcím Weibullových distribucí.

5.4.6.6 *Výpočetní algoritmus a aproximace dat*

Pro aplikaci modelu na experimentální datové řady bylo využito výpočetní prostředí MS Excel. Optimalizační proces probíhal ve dvou sekvenčních fázích:

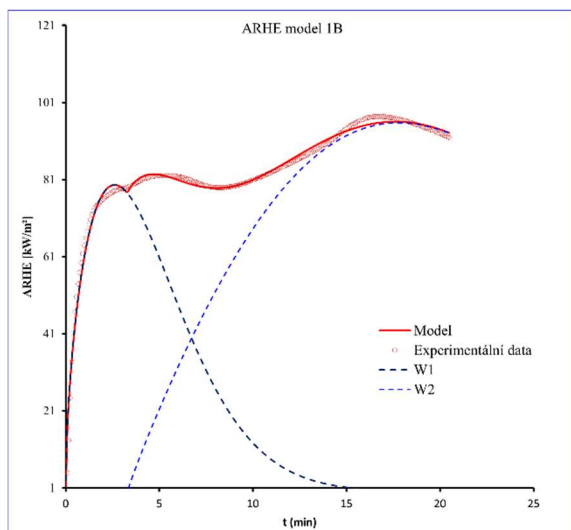
Heuristický odhad

V prvním kroku byly konstanty jednotlivých funkcí A_i , k_i , λ_i stanoveny na základě kvalifikovaného odhadu tak, aby se výsledná sumární křivka vizuálně přiblížila experimentálnímu trendu.

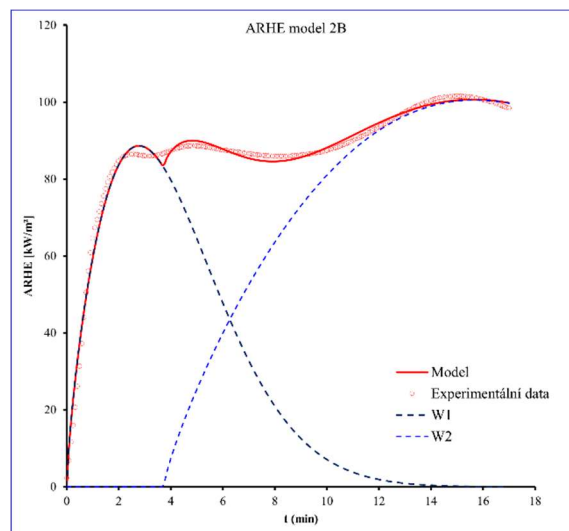
Iterační optimalizace

Následně byl aktivován nelineární optimalizační algoritmus Řešitel, jenž za využití metody nejmenších čtverců (MNC) minimalizoval sumu reziduálních čtverců odchylek mezi modelem a empirickými daty. Tímto způsobem byly matematické konstanty zpřesněny do finální podoby, která vykazuje maximální shodu s reálným průběhem kalorimetrických zkoušek.

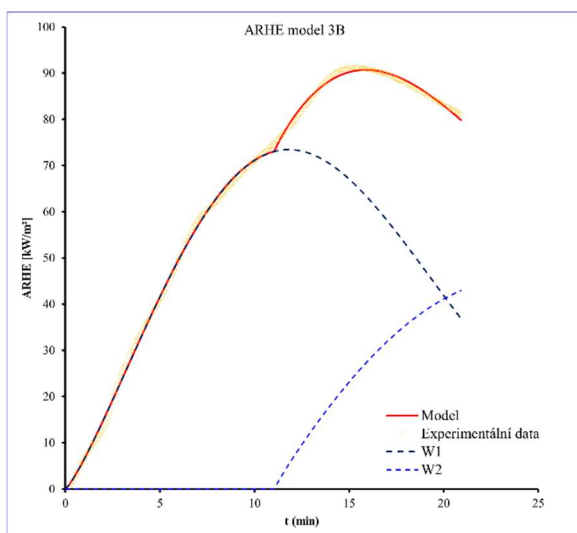
Grafická vyjádření shody experimentálních dat s navrženým duálním modelem pro jednotlivé produktové varianty jsou detailně vizualizována v Obrázku 41 až 50.



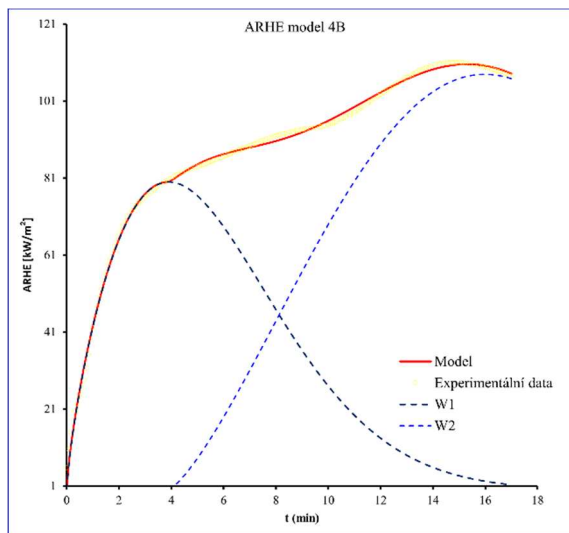
Obr. 39 ARHE model 1B.



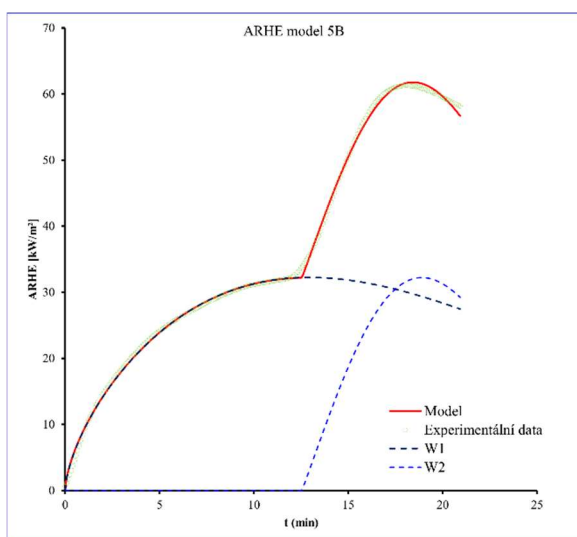
Obr. 40 ARHE model 2B.



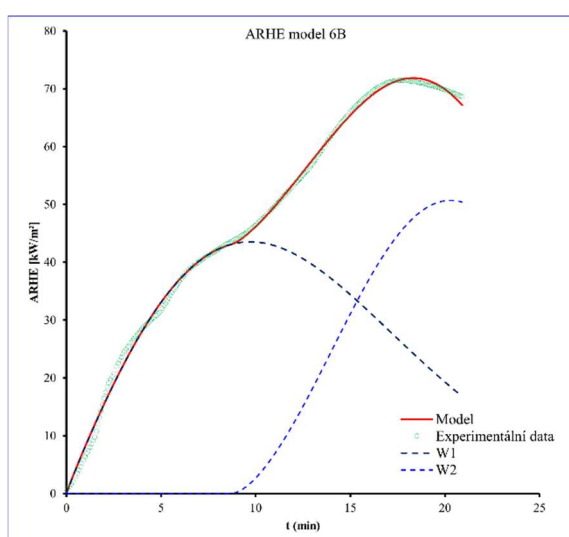
Obr. 38 ARHE model 3B.



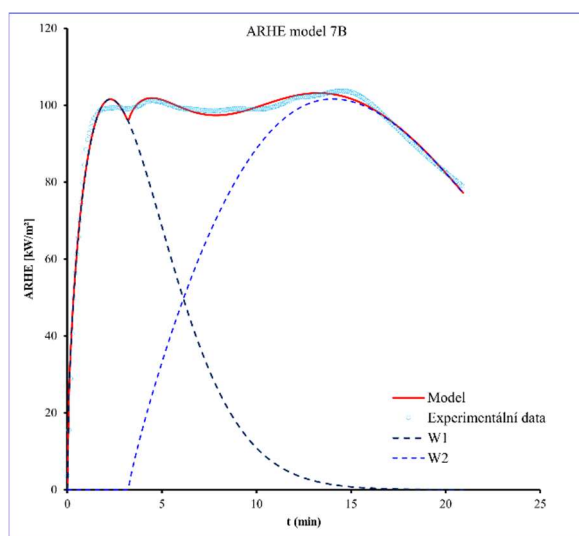
Obr. 42 ARHE model 4B.



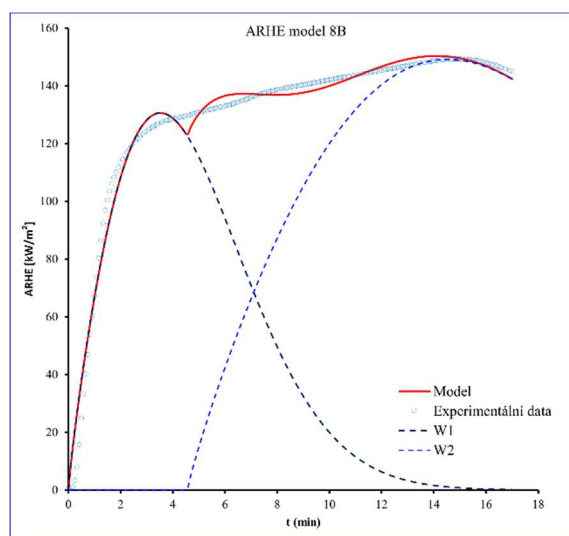
Obr. 43 ARHE model 5B.



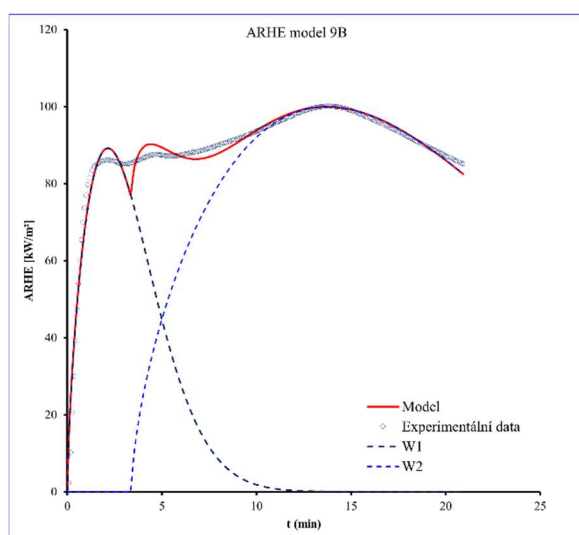
Obr. 44 ARHE model 6B.



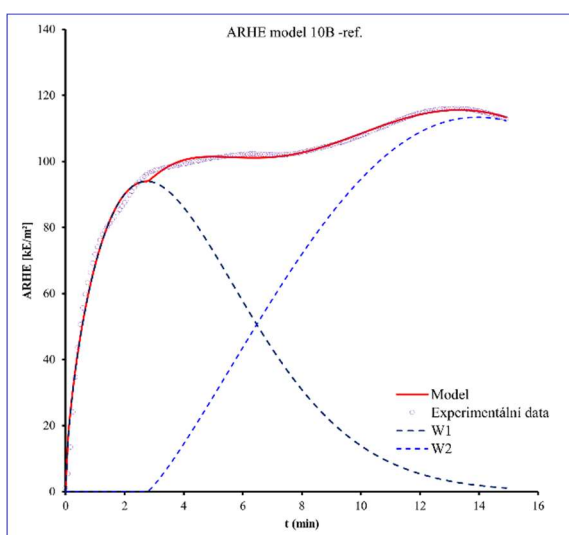
Obr. 39 ARHE model 7B.



Obr. 40 ARHE model 8B.



Obr. 47 ARHE model 9B.



Obr. 48 ARHE model 10B.

5.4.6.7 Lokální nestabilita aproximace a limitace modelu

Při detailní analýze matematické aproximace vykazuje navržený model v parciálních situacích specifickou lokální nestabilitu, respektive anomálii, v oblasti matematického přechodu mezi primární distribuční funkcí w_1 a sekundární distribuční funkcí w_2 . Tento jev se projevuje jako mírné zvlnění nebo vznik sekundárního lokálního píku, případně inflexního bodu, na výsledné sumární křivce obálky modelu.

Typickým příkladem této kinetické anomálie je varianta **7B** (obr. 45), kde model velmi dobře kopíruje náběh první funkce, avšak v tranzitní zóně generuje znatelný lokální kmit před plným rozvojem funkce druhé. Extrémní projev tohoto fenoménu je identifikovatelný u varianty 9B (obr. 47).

Z matematicko-geometrického hlediska je vznik tohoto přechodového píku přímo závislý na úhlu překrytí a kinematické blízkosti obou funkcí. V systémech, kde dochází k výraznému časovému překryvu fází hoření, se tato anomálie zesiluje. Naopak u vysoce efektivních systémů s vysokou mírou fázového rozpojení, tedy decouplingu, jako je varianta 5B (obr. 43), kde je překryv funkcí minimální, se výsledná křivka chová stabilně a k popsanému zvlnění nedochází.

Tato lokální nestabilita nepředstavuje zásadní selhání modelu, ale spíše důsledek zjednodušeného matematického popisu vícefázového procesu hoření pouze dvěma distribučními funkcemi. Model tedy poskytuje velmi dobrou aproximaci celkového trendu a umožňuje kvantitativní porovnání variant, avšak lokální přechodové oblasti mezi w_1 a w_2 je nutné interpretovat opatrně.

Z tohoto důvodu je vhodné považovat navržený model primárně za fenomenologický nástroj pro srovnávací hodnocení retardační účinnosti, nikoli za plně mechanistický popis všech dílčích chemických a fyzikálních procesů probíhajících během hoření.

6 Diskuse výsledků a mezioborová syntéza

Retardace hoření a procesy termické degradace lignocelulózových materiálů představují vysoce komplexní, multikriteriální děje, do kterých vstupuje široké spektrum navzájem závislých materiálových, chemických a fyzikálních parametrů. Předložená disertační práce vykazuje výrazný interdisciplinární charakter, neboť integruje hned několik vědních a technických odvětví: od syntézy a optimalizace retardačních směsí na přírodní i syntetické bázi, přes jejich přímou implementaci do konvenčních průmyslových procesů výroby překližovaných materiálů, až po pokročilou diagnostiku požárně-technických a reziduálních elastomechanických charakteristik.

Vzhledem k tomuto širokému rozptylu, od materiálové chemie, přes procesní inženýrství, až po strukturální mechaniku, je vhodné diskutovat výsledky po jednotlivých tematických celcích. Takové členění umožňuje lépe vysvětlit vztahy mezi použitou úpravou dřív, typem lepicího systému, průběhem hoření, tvorbou kouře, prostupem tepla a zachováním mechanických vlastností.

Z tohoto důvodu je diskusní část systematicky strukturována do čtyř komplementárních funkčních bloků, jež reflektují hlavní vědecké pilíře práce

6.1 Materiálově-technologická integrace retardace

Vztahu mezi chemickou strukturou materiálů na bázi dřeva (celulóza, hemicelulózy, lignin) a polykondenzačními charakteristikami formaldehydových pryskyřic se ve své studii věnovali autoři Wibowo & Park (2025). Formaldehydová adheziva, zejména PF, jsou vysoce citlivá na acidobazickou rovnováhu pH dřevního materiálu. Alkalické PF pryskyřice vyžadují pro optimální průběh methylolace a následného síťování stabilní bazické prostředí (Šulák et al., 2026; Song et al., 2025; Zhou et al., 2025).

Tato skutečnost hraje klíčovou roli při vysvětlení anomálního chování nejúspěšnějších variant **5B**, **3B** a **6B** modifikovaných alkalickým černým louhem v kombinaci s dusíkatými aditivami. Jak uvádí Chen et al. (2026), biogenní lignin obsažený v modifikačních prekurzorech disponuje volnými fenolickými hydroxylovými skupinami, které jsou schopné přímé kovalentní kopolymerizace s methylolovými skupinami PF pryskyřice během vysokoteplotního lisování.

Tato chemická synergie nejenže kompenzuje deficit mechanického zakotvení způsobený změnou smáčivosti, ale v teplotním okně 150–200 °C iniciuje proces dodatečného zesíťování, tedy post-curingu. To koreluje s navrženým modelem duální Weibullové distribuce

a s naměřeným nárůstem reziduální síly F_{max} u těchto variant, neboť nově zformovaná kopolymerní matrice může vykazovat prokazatelně vyšší termomechanickou rigiditu a hustotu sítě.

Současně je však nutné uvést, že moderní výzkum a technologické trendy se snaží postupně omezovat používání PF pryskyřic, například Xiao et al. (2026) anebo Zhang et al. (2025). Tyto práce se zaměřují na vývoj bezformaldehydových lepidel na bázi alkoholových systémů, u nichž bylo dosaženo vysoké pevnosti lepeného spoje a zvýšené odolnosti vůči degradaci působením vody.

Diametrálně odlišný materiálový mechanismus byl identifikován u variant využívajících polyuretanová PUR adheziva, například u varianty **8B**, kde model i vizuální makrostrukturální analýza (obr. 48) odhalily extrémní delaminaci a strukturní kolaps s poklesem tuhosti o 90 %. Fyzikální podstatu tohoto selhání objasňují Aubin et al. (2020) na základě studia reaktivity isokyanátových skupin -NCO. PUR adheziva jsou výrazně závislá na přítomnosti volných hydroxylových skupin dřeva a optimální vlhkosti pro tvorbu uretanových a močovinových vazeb.

Studie autorů Fašalek et al. (2026) přináší klíčové technologické poznatky pro optimalizaci lisovacích procesů. Jako materiálově nejkonzistentnější systém s nízkou druhovou selektivitou identifikuje lepidlo MUF1, zatímco čisté pMDI vykazuje nejvyšší citlivost na anatomickou a chemickou variabilitu dřeva.

Z hlediska pozitivních přínosů pMDI exceluje u difúzně porézních listnáčů; například u břízy dosahuje finální pevnosti přes 9 MPa díky hluboké penetraci, přičemž u dubového jádra síťuje dvakrát rychleji než u bělového dřeva. Výrazná technologická rizika naopak představuje modřín, který kvůli lipofilním extraktivním látkám a nízké smáčivosti výrazně zpomaluje kinetiku vytvrzování adheziv. Dalším rizikovým příkladem je anatomicky hustý buk, vyžadující zvýšení lisovacího tlaku na 2,5 MPa, a také struktura břízy, u níž pod vlivem tlaku dochází k rychlému otečení vodou ředitelných MUF lepidel do hloubky jedné z dých. Tento jev vede ke vzniku podvyživených lepených spár s pevností přibližně 3 MPa.

Studie autorů Favis et al. (2024) prokazuje, že při lepení vlhkého dřeva pomocí 1K PUR adheziv je optimální vlhkost přibližně 30 %, tedy blízko bodu nasycení vláken, v kombinaci s otevřeným časem 15 min. Tato konfigurace bezpečně splňuje limit normy EN 16351, tedy 3,5 MPa. Naopak extrémní vlhkost 101 % snižuje pevnost spáry o 50 %, tedy hluboko pod normovou hranici. Tento kolaps postihuje zejména systémy s dlouhým otevřeným časem, například 40 min, kde přebytek volné vody indukuje nežádoucí dvoustupňové vytvrzování.

Rychlá povrchová polymerace vytvoří bariéru, která izoluje zbytek lepidla, brání jeho dotvarování a oslabuje spoj.

V kontextu průmyslové praxe tyto poznatky potvrzují hlubší problematiku impregnace dýh retardéry hoření na bázi vodných roztoků. Práce proto klade důraz na nutnost opětovného vysušení a přesného klimatizování jednotlivých vrstev na homogenní vlhkost v rámci celého lepeného formátu, což představuje jedno z hlavních technologických úskalí, které může celý proces průmyslové výroby výrazně prodloužit.

Studie autorů Lins et al. (2024) se zabývá vztahem mezi kinetikou vytvrzování adheziv za suboptimálních, tedy nízkých teplot a vývojem jejich makromechanických vlastností. Autoři prokazují, že pro zahájení nárůstu kohezní a adhezní pevnosti spoje je nezbytné dosáhnout kritické prahové hodnoty chemické konverze, tedy stupně zesíťování.

V kontextu této disertační práce takový poznatek podporuje interpretaci chování variant modifikovaných retardéry hoření. Přítomnost zpomalovačů hoření na fázovém rozhraní totiž může fungovat analogicky jako nízkoteplotní prostředí: chemicky nebo chemicko-termicky interferuje s adhezivní matricí, narušuje lokální teplotní gradient a dramaticky zpomaluje kinetiku vytvrzování.

Výzkum Lins et al. (2024) tak podporuje metodologii této práce v tom, že pro predikci reziduální tuhosti kompozitu po termické degradaci nelze spoléhat pouze na makroskopická mechanická data, ale je vhodné matematicky modelovat mikrostrukturní kinetiku chemické konverze adheziva, která je retardačními aditivami přímo ovlivněna.

Pokud jsou do systému zavedeny retardéry hoření s vysokou afinitou k vodě anebo látky měnící iontovou sílu na fázovém rozhraní, může docházet k parciální deaktivaci isokyanátu. Pizzi et al. (2021) ve své práci potvrzují, že přítomnost solí a transientních chemických aditiv vyvolává předčasnou disociaci prepolymery a inhibuje tvorbu trojrozměrné sítě. Výsledná polymerní mezivrstva vykazuje nízkou termickou odolnost.

Při expozici teplotnímu gradientu dochází k rychlé termolýze PUR matrice již při teplotách kolem 140–160 °C, což vede ke ztrátě smykové soudržnosti, separaci dýh a akceleraci odhořívání celého kompozitu, jak bylo prokázáno v kalorimetrické analýze této práce.

6.2 Mechanická integrita a kohezní pevnost kompozitu za studena

Termomechanická degradace dýhových vrstev ošetřených odlišnými typy retardérů hoření indukuje vznik heterogenních fázových rozhraní se specifickou distribucí lokálních mechanických vlastností. Během pyrolýzy se projevuje vliv dodatečného síťování polymerní matrice, determinovaný zejména interakcí aditiv s fenol-formaldehydovým polykondenzátem. Výsledná makroskopická odezva vrstveného kompozitu je dána integrací těchto lokálních jevů podél tloušťky materiálu.

Matematický popis tohoto chování reflektuje mikromechanické modely Nguyen (2024), který za využití polarizační (PA) a diferenciální (DA) aproximace formuloval explicitní algebraické vztahy pro makroskopické moduly pružnosti heterogenních struktur s nedokonalým kontaktem fází, tedy pro modely pružné vrstvy a povrchového napětí. Vysoká shoda těchto analytických přístupů s numerickými simulacemi na bázi rychlé Fourierovy transformace (*FFT*) potvrzuje, že vhodnou kalibrací koeficientů fázového rozhraní lze efektivně řídit a predikovat globální elastické konstanty materiálu.

V kontextu dat této práce uvedená koherence podporuje nutnost přesného podchycení mezifázové adheze dýha–retardér–lepidlo, neboť lokální smyková a normálová poddajnost rozhraní zásadně modifikuje přenos napětí v degradovaném průřezu.

Synergickým krokem v architektuře hodnocených vzorků byla modifikace dýh černým louhem za účelem navýšení podílu strukturního ligninu a jeho následné křížové interakce s celulózą a retardéry hoření. Ahmadi et al. (2025) v přehledu hořlavosti materiálů s přírodními vlákny (NFPC) uvádějí, že chemické složení biomasy zásadně předurčuje kinetiku hoření: krystalická celulóza degraduje na hořlavé těkavé podíly urychlující propagaci plamene, zatímco lignin disponuje vysokou inherentní tepelnou stabilitou a indukuje tvorbu pevné zuhelnatělé bariéry (charu), jež omezuje difuzi tepla a kyslíku.

Výzkum zároveň upozorňuje na negativní aspekt konvenčních aditiv, která mohou kvůli aglomeraci a narušení mezifázové adheze způsobovat výrazný pokles pevnosti v tahu, uváděný v rozmezí 20–60 %. Jako mechanicky optimální se jeví aplikace pevných 2D nanomateriálů, například grafenu nebo nanojílů, tvořících fyzikální bariéru, případně vývoj udržitelných bio-retardérů na bázi chitosanu, kyseliny fytové či samotného ligninu, jež eliminují perzistenci a bioakumulaci syntetických ekvivalentů.

Zjištění této práce týkající se černého louhu tento trend podporují. Integrace ligninové složky efektivně posiluje bariérový efekt zuhelnatělé vrstvy, aniž by docházelo k tak výrazné degradaci mezifázové soudržnosti, jaká může doprovázet některá pevná syntetická aditiva.

Biomimetická transpozice makrostruktury a ochranné funkce stromové kůry do konceptu vícevrstvého materiálu umožnila střídáním dých s odlišnými požárními inhibitory dosáhnout vysokého stupně materiálové synergie. Otázkou pro budoucí výzkum zůstává přímá extrakce polyfenolických látek z kůry pro tvorbu přírodních retardérů.

Durmaz et al. (2025) sice prokázali, že inkorporace hrubé stromové kůry do dřevoplastových kompozitů (WPC) vyvolává lineární pokles mechanických parametrů, konkrétně pevnosti v ohybu o 23 %, modulu pružnosti o 39 % a pevnosti v tahu o 35 %, avšak v oblasti environmentální stability vykazuje kůra díky vysoké antioxidační aktivitě schopnost inhibovat UV fotodegradaci a potlačovat barevné změny matric. TGA a DSC analýzy u těchto systémů potvrdily významnou modifikaci termální stability.

Z hlediska předkládané práce to naznačuje, že namísto přímého plnění je technologicky výhodnější izolovat aktivní extraktivní frakce kůry a aplikovat je do fázových rozhraní dých. Tím lze potenciálně simultánně zvýšit požární odolnost a zpomalit termo-oxidativní stárnutí bez výrazné penalizace ohybové tuhosti.

Experimentálně byla verifikována klíčová role kinetiky růstu a strukturní stability zuhelnatělé vrstvy vztahu k celkové zbytkové únosnosti. Na rozdíl od metodiky Gangi et al. (2024), kteří podrobili více orientované překližky simultánnímu mechanickému zatěžování v třibodovém ohybu a jednostrannému tepelnému toku, tedy sledování selhání v čase expozice, byly vzorky v této studii testovány destruktivně až po kompletním ukončení požární fáze.

Navzdory metodické odlišnosti obě práce konvergují k nutnosti popisu nelineárního úbytku tuhosti průřezu. Gangi et al. (2024) při analýze měřítkového modelování, tedy při geometrii $1/2$ a $1/4$, identifikovali závažné anomálie. Menší vzorky $1/4$ vykazovaly zrychlené odpařování vlhkosti a dřívější nástup pyrolýzy, tedy urychlení relativního růstu zuhelnatělé vrstvy a podléhaly předčasnému kolapsu v důsledku lokálního vzpěru (bucklingu) tlačných vrstev a delaminace tenkých dých. Větší vzorky $1/2$ naopak selhávaly primárně tahem na neexponované straně.

Tento rozpor potvrzuje, že klasická analytická pravidla měřítkování, založená například na Fourierově čísle, jsou pro predikci strukturální odezvy velkých stavebních prvků z malorozměrových zkoušek omezená. Pro přesnější extrapolaci dat je nezbytné implementovat nelineární termo-strukturální numerické modely, které zohledňují posun pyrolýzní fronty napříč specifickou sekvencí vrstvení.

Komplexní analýza experimentálních dat a rešeršních zdrojů ukazuje, že pro predikci požární bezpečnosti vrstvených materiálů na bázi dřeva je kritické popsat vztah mezi vnitřní architekturou fází a jejich zbytkovou pevností po termální degradaci. Vzhledem k absenci

ucelených multifyzikálních modelů schopných provázat kinetiku pyrolýzy s nelineárním úbytkem tuhosti u reálných velkorozměrových konstrukcí se jako perspektivní jeví implementace pokročilých matematických nástrojů, konkrétně umělých neuronových sítí (ANN) a algoritmů umělé inteligence (AI).

Tyto systémy mohou řešit spřažené transportní a mechanické úlohy s vysokou mírou korelace, což by umožnilo flexibilní optimalizaci vrstvených struktur, přesnější integraci materiálových dat do projekčních softwarů a exaktní dimenzování prvků pasivní požární ochrany moderních vícepodlažních dřevostaveb.

6.3 Hodnocení synergických mechanismů použitých aditiv a jejich environmentální permanentnost

Na základě vybraných vědeckých prací představuje sulfátový (kraftový) lignin, izolovaný z papírenského černého louhu, vysoce efektivní bio-retardér hoření působící primárně v kondenzované fázi. Termická degradace samotného ligninu je charakterizována jako komplexní proces, který je zahajován při teplotách kolem 200 °C štěpením méně stabilních alkyl-aryl etherových vazeb, přičemž hlavní fáze dekompozice spojená s uvolňováním těkavých fenolických zplodin probíhá v rozmezí 300 až 450 °C (Brebu et al., 2010).

Za klíčový je považován mechanismus tvorby uhlíkatého zbytku (*char formation*), jemuž reaktivní aromatické struktury ligninu při vysokých teplotách výrazně podléhají. Tímto procesem je polymerní matrice transformována na stabilní uhlíkatou bariéru, která slouží jako fyzikální štít chránící hlubší vrstvy materiálu před přísunem kyslíku a zároveň omezuje únik hořlavých plynů do zóny hoření.

Při praktické aplikaci v polymerních či lignocelulózových systémech lze ligninem dosahovat významných výsledků v oblasti potlačení dýmotvornosti a snížení hořlavosti. V předkládané disertační práci bylo řešeno zapojení těchto bio-retardérů do vrstvených materiálových struktur, přičemž experimentální část potvrdila, že takto realizovaná modifikace účinně snižuje celkovou energetickou bilanci požárního zatížení.

Jak bylo v disertační práci prokázáno, u optimálních vzorků došlo k redukci celkového uvolněného tepla (*THR – Total Heat Released*) o více než 50 %, tedy do rozmezí 70–90 MJ oproti referenční variantě. Integrací modifikovaného ligninu je dosahováno výrazného nárůstu

pevného uhlíkatého zbytku po vyhoření, což může korelovat s poklesem *THR* a potvrzuje schopnost této modifikace fixovat uhlík v pevné fázi (Yang et al., 2021).

Pro dosažení ještě vyšší retardační účinnosti je v moderním materiálovém inženýrství využívána chemická modifikace reaktivních hydroxylových skupin v polymerní síti ligninu, nejčastěji prostřednictvím fosforylace (Prieur et al., 2016). Fosforylovaný kraftový lignin může vyvolávat silný synergický efekt, kdy přítomnost fosforu stimuluje tvorbu ochranného fosfo-uhlíkatého skla na povrchu materiálu. Tím je materiálu zajišťována zvýšená dlouhodobá termální stabilita a zároveň je možné plnit ekologické požadavky bez nutnosti použití toxických halogenovaných retardérů.

Na základě termodynamických principů popsanych v krystalografických studiích vykazuje implementace anorganické fáze síranu sodného Na_2SO_4 do materiálových struktur odlišný kinetický mechanismus než bio-retardéry hoření na bázi ligninu. V termodynamických analýzách bylo prokázáno, že síran sodný podléhá při teplotním cyklování výraznému fázovému přechodu s mezní linií metastability pro dekahydrát v rozmezí $\Delta T \approx 40\text{--}46\text{ }^\circ\text{C}$ (Claude et al., 2026).

Tato krystalická nestabilita a sklon k tvorbě metastabilního heptahydrátu mohou uvnitř porézní matrice materiálu vyvolávat vnitřní pnutí a objemové změny (Steiger, et al., 2008). Fixace čistého, nemodifikovaného síranu sodného v lignocelulózových maticích je proto dlouhodobě limitována krystalizačními tlaky soli, jež mohou při environmentálním stárnutí způsobovat mikrostrukturální defekty.

Při komparaci těchto předpokladů s výsledky dosaženými v předkládané disertační práci je zřejmé, že anorganické aditivum Na_2SO_4 plní v materiálu dominantně funkci fyzikálního dilučního plniva. Zatímco fixovaný kraftový lignin přispívá k tvorbě stabilního uhlíkatého zbytku a chemické inhibici v kondenzované fázi, síran sodný zvyšuje celkovou popelnatost a tepelnou kapacitu systému, aniž by aktivně podporoval uvolňování reaktivní plynové fáze H_2O v hlavním teplotním okně rozkladu matrice.

Experimentální část disertační práce potvrdila, že optimální požární odolnosti a snížení celkového uvolněného tepla (*THR*) je dosahováno vhodnou kombinací a synergií obou složek. Organický podíl zajišťuje bariérový efekt tvorby uhlíkatého zbytku a anorganická sůl působí jako inertní plnivo. Tím je možné omezit riziko snížení dlouhodobé strukturní stálosti výsledného materiálu.

Vývoj supramolekulárních „all-in-one“ teplem expandujících retardérů hoření účinně překonává limity tradičních fyzikálních směsí, jako jsou migrace aditiv a nehomogenní disperze

v polymerních matricích. Integrovaním kovových alginátových komplexů s polyfosforečnanem amonným (APP) dochází ke stimulaci tvorby vysoce uspořádaných grafitických domén. To vede k poklesu rychlosti uvolňování tepla a potlačení dýmotvornosti v důsledku fixace rozkladných produktů v kondenzované fázi (Tao et al., 2026).

Alternativní biosyntetickou strategií představuje kombinace aminofosforylovaného β -cyklodextrinu s dihydrogenfosforečnanem hlinitým, kde vícenásobné vodíkové a Lewisovy vazby brání fázové separaci. Tento systém vykazuje velmi rychlou intumescentní odezvu spojenou s uvolňováním inertních plynů v plynné fázi a zabudováním atomů hliníku do uhlíkaté sítě. Tím vzniká mechanicky i termicky rigidní hybridní bariéra chránící substrát před prohořením (Teng et al., 2026).

Při aplikaci intumescentních systémů na porézní lignocelulóзовé materiály a termosetické materiály je klíčovým faktorem kinetika chemických reakcí na fázovém rozhraní. Využitím in situ reaktivních nátěrů regulovaných dihydrogenfosforečnanem amonným (ADP) dochází nad teplotou 200 °C k přednostní esterifikaci a dehydrataci celulóзовých řetězců, čímž se potlačuje tvorba hořlavých dehtů a podíl pevného uhlíkatého zbytku vzrůstá na více než trojnásobek. Fixovaná síť aminoplastu současně zvyšuje stálost ochrany proti vymývání vodou (Sun et al., 2026).

Pokud je polyfosforečnan amonný (APP) přímo objemově aditivován do epoxidových pryskyřic vyztužených přírodními vlákny, kyselá katalýza sice posouvá počátek hlavní dekompozice k nižším teplotám a zvyšuje limitní kyslíkový index, avšak rozdílná polarita složek indukuje mezifázové mikrotrhliny s tendencí ke snižování tahové pevnosti (Nagaraj et al., 2026).

V předkládané disertační práci bylo prokázáno, že optimální požární odolnosti je dosahováno cílenou synergií intumescentní složky s matricí. Tento závěr je v souladu s literaturou a ukazuje, že vhodně navržený systém může omezit kapilární difuzi vody, zvyšovat rozměrovou stálost a podporovat dlouhodobou životnost materiálu.

Výzkum udržitelných a k životnímu prostředí šetrných systémů požární ochrany se v současnosti prioritně orientuje na eliminaci tradičních halogenovaných aditiv, která jsou problematická kvůli perzistenci, bioakumulaci a toxicitě emisí. Přechod k bio-derivovaným retardérům hoření, jako jsou makromolekulární struktury na bázi ligninu či alginátů, představuje významný ekologický směr, neboť tyto látky vykazují nižší environmentální dopad, přispívají k uhlíkové neutralitě a jsou dostupné z obnovitelných zdrojů (Chen et al., 2024).

Integrovaním metal-alginátových komplexů s anorganickými polyfosforečnany (APP) je na molekulární úrovni dosahováno významného potlačení dýmotvornosti a současně je

eliminováno nežádoucí vymývání (leaching) a migrace aditiv z polymerní matrice (Tao et al., 2026).

Z hlediska hodnocení životního cyklu (LCA) vykazují tyto materiály potenciál pro mechanickou a chemickou recyklovatelnost na konci životnosti. Při jejich termickém rozkladu navíc nedochází k uvolňování toxických dioxinů či halogenovodíků, což podporuje potenciál bio-retardérů pro integraci do procesů cirkulární ekonomiky (Chen et al., 2024).

Paralelní směr v ekologické optimalizaci materiálového inženýrství představuje implementace iontových kapalin (ILs) jako multifunkčních zelených aditiv. Jak ukazují moderní bibliometrické a strojově učené analýzy, iontové kapaliny v kombinaci s organofosforovými složkami vykazují velmi nízkou těkavost, vysokou termální stabilitu a schopnost substituovat toxické vyplavitelné soli (Pan et al., 2023).

V předkládané disertační práci bylo prokázáno, že synergie bio-derivovaných struktur, zejména ligninu z černého louhu, s optimalizovanými anorganickými a dusíkatými fázemi vyvolává koordinovaný retardační efekt. Tento systém omezuje tvorbu kouře a snižuje celkovou energetickou bilanci požárního zatížení, aniž by bylo nutné využívat halogenové retardéry.

Použití pokročilých metod modelování a algoritmů strojového učení (*machine learning*) dnes navíc umožňuje cíleně navrhovat molekulární struktury retardérů tak, aby bylo dosaženo vysokého limitního kyslíkového indexu (*LOI*) při zachování biologické odbouratelnosti a možnosti opětovného zpracování materiálu během recyklačních cyklů (Pan et al., 2023).

Předkládaná disertační práce otevřela nové možnosti v oblasti implementace vrstvených systémů retardace hoření a popsala přechody mezi povrchovými a vnitřními termodegradačními ději v aglomerovaných materiálech na bázi dřeva. Získané poznatky jsou významné pro budoucí predikci vlivu chemické struktury aditiv na protipožární odolnost a navazující statickou únosnost stavebních konstrukcí za požáru.

Současný vědecký trend směřuje k numerickému modelování, například v softwaru COMSOL Multiphysics, avšak vysoká komplexnost hoření často vede ke zjednodušení vstupních dat, což do simulací vnáší statisticky významné chyby. V předkládané práci bylo experimentálně potvrzeno, že i při zachování 80 % identické lignocelulózové matrice, tedy smrkové loupané dýhy, vykazují vzorky pod stejným termickým zatížením výrazně odlišnou odezvu a zbytkovou mechanickou pevnost v závislosti na typu použité modifikace.

Pro budoucí výzkum je proto nezbytné integrovat pokročilé modelovací softwary s přesně vymezenými parametry šíření tepla. To vzhledem k velkému množství empiricky obtížně testovatelných variant umožní přesněji kvantifikovat vliv různých koncentrací aditiv na specifické typy požárů.

Klíčovým socio-ekologickým přínosem této práce je orientace na udržitelná a netoxická bio-aditiva, která dlouhodobě méně zatěžují životní prostředí a vykazují vysokou permanentnost v rámci cirkulární ekonomiky (Chen et al., 2024). Navržený systém překonává některé limity komerčních zpěňujících nátěrů, jež jsou náchylné k mechanickému poškození, degradaci vlhkostí a často vyžadují dodatečnou stabilizaci krycími laky. To komplikuje jejich prefabrikaci, transport a finální formátování na staveništi.

Uzamčením vyvinutých bio-retardérů přímo v hloubkové struktuře vrstveného materiálu bylo dosaženo efektivního potlačení těkavosti látek do okolního prostředí, minimalizace jejich migrace a zvýšení rezistence materiálu vůči vnějším abrazivním, teplotním a vlhkostním vlivům (Tao et al., 2026). Tímto způsobem je stabilizována mezifázová trvanlivost, což otevírá reálné perspektivy pro uplatnění ekologicky šetrných, objemově chráněných materiálů v moderním udržitelném stavitelství.

6.4 Validace aproximační schopnosti modelu a verifikace experimentálních dat

Numerické modelování je v současné době považováno za jeden ze základních pilířů materiálového inženýrství, přičemž v éře rychlého vývoje pokročilých materiálů na bázi dřeva, u nichž chybí dlouhodobá zkušenost z praxe, se stává významným nástrojem. Prostřednictvím vhodných simulačních aparátů je umožněno rychlé a efektivní předběžné třídění potenciálně vyhovujících variant a prediktivní návrh správných konstrukčních řešení.

V obecné rovině lze tyto přístupy rozdělit na modely zaměřené na prostorové výpočty chování těles, zpravidla ve 3D prostoru a v měřítku 1:1, kde je sledována makromechanická či fyzikální odezva na vnější zatížení, a na modely interpretační, jejichž účelem je hlubší rozbor experimentálně naměřených dat. Druhá jmenovaná kategorie nabývá na významu právě u složitých dějů, jako je termická degradace, kde výsledná spojitá křivka sledované veličiny v sobě zahrnuje řadu paralelně probíhajících, střídajících se či nově vznikajících a zanikajících fyzikálních a chemických procesů.

Jelikož z pouhého naměřeného tvaru takové integrální křivky nelze jednoznačně identifikovat konkrétní fáze děje, jsou implementovány pokročilé interpretační modely. Tyto nástroje jsou schopny na základě experimentálních dat a předchozích měření podrobně analyzovat daný průběh a identifikovat méně zjevné vnitřní mechanismy systému. Tento přístup byl v širším vědeckém kontextu popsán napříč spektrem analyzovaných přístupů,

od zjednodušení rozměrovosti turbulentního spalování a rozsáhlých spřažených výsledků proudění, přes modelování fluktuací uvolňování tepla (HRR) a transportních dějů v porézních médiích, až po moderní neuro-simulační systémy informované termodynamikou.

Je však nutné zdůraznit, že zvyšující se složitost modelu s sebou přirozeně přináší vyšší počet proměnných a riziko obtížnější interpretace. V závislosti na konkrétní aplikaci tak může složitý výpočetní systém představovat buď mimořádnou interpretační výhodu, nebo analyticky problematický nástroj, zejména pokud není dostatečně ukotven v experimentálních datech.

6.4.1 Datově orientované modelování spalovacích procesů

Práce autorů Lacey et al. (2024) se zabývá pokročilým datově orientovaným modelováním turbulentního předem promíchaného spalování za využití metod zjednodušení rozměrnosti, konkrétně modelování založeného na varietách. Hlavním předmětem modelování je v tomto případě okamžitá podmíněná rychlost disipace proměnné pokroku, která představuje kritický parametr nezbytný pro matematické uzavření jednorozměrných rovnic dané variety.

Výzkum bezprostředně reaguje na nedostatky běžně používaných modelů, jejichž profily byly dosud odvozovány pouze analyticky za cenu zjednodušujících předpokladů. Nově navržený datový přístup se zaměřuje na modelování závislosti této disipační rychlosti na proměnné v čase, přičemž dokáže popsat vysoce nelineární, asymetrické a lokálně omezené charakteristiky disipačních profilů přímo z reálných dat plamene. Tím může zvyšovat přesnost a efektivitu numerických simulací spalovacích procesů.

V kontextu této disertační práce je důležité, že obdobný princip je využit i při interpretaci kalorimetrických dat. Namísto prostého porovnání izolovaných maxim je průběh ARHE analyzován jako nelineární signál složený z více dílčích fází. Navržený duální Weibullův model tak představuje analogický interpretační nástroj, který umožňuje rozdělit globální odezvu materiálu na fyzikálně interpretovatelné složky.

6.4.2 Modelování šíření požáru a vazba na laboratorní měřítko

Přehledová studie autorů Silva et al. (2022) mapuje vývoj modelování šíření požárů za poslední dvě dekády a rozděluje stávající přístupy na matematické, empirické, CFD simulace a GIS systémy. Primárním cílem těchto metod je předpovědět rychlost šíření (ROS), geometrii fronty a dynamiku toků tepla.

Výzkum poukazuje na limity nepružných empirických modelů a vytyčuje budoucí směr v podobě obousměrně vázaných (*two-way coupled*) CFD simulací schopných popsat komplexní nelineární interakce plamene s okolím. V kontextu disertační práce je klíčové, že ačkoli se tato studie zabývá makroskopickým měřítkem lesních požárů, obecné principy modelování jsou přenositelné i do laboratorního měřítka.

Stejně fyzikální a chemické zákonitosti nelineárního šíření tepla, hmoty a fázových přeměn materiálu totiž zásadně ovlivňují jak požáry budov, tak samotné hoření a termickou degradaci vzorků při zkouškách na kónickém kalorimetru. Z tohoto důvodu lze výsledky laboratorního modelování chápat jako dílčí, ale významný příspěvek k pochopení širších mechanismů požární odezvy lignocelulózových kompozitů.

6.4.3 Modelování *HRR* a význam nelineárních fluktuací

Studie autorů Shamooni et al. (2018) je zaměřena na numerickou předpověď rychlosti hoření a rychlosti uvolňování tepla (*HRR*) v difúzních plamenech syntézního plynu za využití spalovacích modelů založených na měřítkové podobnosti. Hlavním předmětem modelování bylo matematické podchycení komplexních interakcí mezi turbulencí a chemickými reakcemi, které v systému způsobují lokální zhášení a opětovné zapalování plamene.

V kontextu předkládané disertační práce je v této zahraniční studii, i přes její primární orientaci na plynnou fázi a proudění, patrný obdobný vědecký cíl, kterým je predikce kinetiky uvolňování tepla. Tento parametr je klíčovým kritériem i pro experimentální část vlastního výzkumu realizovanou pomocí kónické kalorimetrie.

Poznatky publikované autory Shamooni et al. (2018) tak potvrzují, že silně nelineární anomálie a fluktuace v energetické bilanci hoření, ať už vyvolané turbulencí v plynech, nebo teplotním gradientem a chemickou aktivací retardérů v pevných dýhových kompozitech, vyžadují aplikaci pokročilých výpočetních postupů. Tím je podpořena přidaná hodnota navrženého metodického přístupu: tam, kde běžné empirické srovnání jednotlivých hodnot poskytuje pouze omezený popis, umožňuje duální Weibullův model kvantitativně zachytit nelineární výkyvy a převést je do interpretovatelných parametrů.

6.4.4 Přístupy založené na neuronových sítích a limity čistě datových modelů

Studie autorů Tierz et al. (2025) je zaměřena na ověření odolnosti základních modelů (*foundation models*) a naučených simulátorů v mechanice kontinua při radikálních změnách geometrie a konstitutivních zákonů. V kontextu předkládané disertační práce lze v tomto konceptu spatřovat základ pro budoucí neuro-simulační vývoj.

Zatímco citovaná práce poukazuje na limity čistě datových modelů při odhadu mimo rozsah původních dat, v této disertační práci uplatněný duální Weibullův model slouží jako fyzikálně ukotvený prekurzor. Superpozicí Weibullových funkcí je naměřeným datům termické degradace přiřazena kinetická logika, což může do budoucna umožnit korektnější trénování neuronových sítí informovaných termodynamikou.

Tímto spojením deterministického základu s pokročilým strojovým učením lze definovat perspektivní směr pro autonomní predikci požárního chování modifikovaných materiálů.

6.4.5 Překonání rozdílu mezi simulací a realitou

Studie autorů Zhao et al. (2025) je zaměřena na překonání mezery mezi simulací a realitou (*reality gap*) hodnocením schopnosti modelů světa predikovat komplexní jevy v oblasti termodynamiky. Autoři kriticky je poukazují na to, že současné autonomní systémy vykazují při odhadu mimo rozsah původních dat značné limity.

Právě v této souvislosti se projevuje opodstatněnost metodického přístupu zvoleného v rámci vlastního výzkumu. Uvedené úskalí čistě datových modelů je částečně eliminováno uplatněním navrženého duálního Weibullova modelu. Superpozicí Weibullových funkcí je experimentálními datům termické degradace přiřazen fyzikálně-kinetický rámec.

Tento deterministický prekurzor tak poskytuje exaktně strukturovaný základ pro budoucí trénování neuronových sítí a může přispět k překonání *reality gap* při autonomní predikci požárního chování modifikovaných materiálů.

6.4.6 Modelování transportních dějů v heterogenních a porézních strukturách

Studie autora Balankin (2020) je zaměřena na vývoj konceptu prostorů s neceločíselnou dimenzí (*fractional space approach*) pro modelování transportních dějů a fyzikálních fenoménů ve fraktálních a prostorově omezených systémech. Hlavním předmětem výzkumu bylo

matematické podchycení strukturní heterogenity prostředí, která zásadně modifikuje charakter klasické difúze a přenosu energie.

Z hlediska metodologie vlastního výzkumu tento přístup přináší teoretické opodstatnění pro modelování nelineárního chování v anizotropních strukturách. Děje probíhající v silně degradovaném porézním prostředí, jakým je například zuhelnatělá povrchová vrstva dýhových materiálů, vykazují strukturální odchylky, které nelze spolehlivě popsat standardními euklidovskými rovnicemi.

Navržený duální Weibullův model sice nepředstavuje frakcionální transportní model v pravém slova smyslu, ale umožňuje zachytit výslednou makroskopickou odezvu systému, v níž se heterogenita porézní zuhelnatělé vrstvy a postup pyrolýzní fronty promítají do asymetrického, vícefázového průběhu *ARHE*.

7 Závěr

Předkládaná disertační práce byla zaměřena na vývoj nového vrstveného materiálu na bázi dřeva se zvýšenou požární odolností. Zvolené retardéry hoření byly vybrány s ohledem na maximální ekologickou šetrnost a udržitelnost; v rámci posuzování celkového životního cyklu materiálu byl kladen důraz na jeho možnou recyklovatelnost po ukončení životnosti, umožňující například následné materiálové nebo biologické využití. Výzkum komplexně pokrývá celý produkční cyklus od samotné výroby velkoplošných překližovaných materiálů až po jejich experimentální testování.

Práce se zaměřuje jak na identifikaci a popis základních mechanismů degradace v materiálu během tepelného namáhání, tak na hodnocení jeho chování v reálných konstrukčních prvcích (aplikační řešení). Klíčovým aspektem pro exaktní interpretaci experimentálních dat je pokročilý přístup k jejich matematickému vyhodnocení. Za účelem hloubkové analýzy kinetiky hoření byl aplikován aproximační a interpretační model založený na kombinaci dvou Weibullových distribučních funkcí. Tento metodický přístup umožňuje matematicky rozlišit proces hoření na dvě navazující fáze: počáteční (povrchové) hoření materiálu a následné vnitřní hoření materiálu. Kvantifikace poměrného zastoupení a vzájemného překryvu těchto dvou fází je kritická pro přesnou charakteristiku zóny generování maximálního tepelného toku.

Předkládaná práce měla stanovené čtyři hlavní cíle:

- Stanovení vlivu retardéru na povrch materiálu z hlediska jeho adheze vzhledem ke standardním druhům adheziva.

Tento stanovený cíl disertační práce byl realizací přesně definovaného technologického postupu při výrobě zkušebních vzorků plně splněn, přičemž výsledná adhezní soudržnost byla následně verifikována prostřednictvím řízeného mechanického namáhání, což poskytlo exaktní podklady pro objektivní posouzení vlivu modifikace retardéry hoření na povrchové vlastnosti u všech sledovaných materiálových kombinací.

Úspěšné naplnění cíle bylo jednoznačně demonstrováno stanovením komparativních limitů jednotlivých typů pojiv na základě dat z mechanického testování. Zatímco u variant využívajících kombinaci retardérů hoření a fenolformaldehydové pryskyřice bylo dosaženo vysokých hodnot pevnosti adhezního spoje – a to jak ve fázi nánosu díky optimální smáčivosti modifikovaného povrchu dýh, tak během procesu termického vytvrzování (polykondenzace),

kde byl navíc u specifických modifikací detekován sekundární synergický efekt dodatečného zesíťování na rozhraní.

Srovnávací materiálová varianta **8A** vykazovala diametrálně odlišné chování. Tato specifická varianta byla tvořena výhradně čistými, nemodifikovanými dýhami bez jakékoli přítomnosti retardérů hoření a jako pojivo zde bylo aplikováno polyuretanové adhezivum (PUR). Při mechanickém testování po termické expozici bylo u této varianty již za podmínek relativně nízkého tepelného zatížení dosaženo prokazatelně nejnižší adhezní soudržnosti. Tento kontrastní výsledek přinesl zásadní vědecké poznatky o termických limitech samotné polyuretanové matrice v porovnání s vysoce stabilním systémem reaktivního spojení fenol-formaldehydové pryskyřice a retardérů hoření.

- Stanovení hloubky penetrace různých retardérů hoření a jejich vliv na strukturu dřeva.

Při řešení této problematiky byla hodnocena účinnost vakuo-přetlakové impregnace u loupaných smrkových dýh o nominální tloušťce 2 mm. Optimalizovaný impregnační cyklus, kombinující fázi počátečního podtlaku (vakuování) a následného hydraulického přetlaku, zajistil úplnou penetraci vodných roztoků retardérů hoření v celém průřezu dýhových listů. Tímto způsobem bylo dosaženo kompletního zaplnění mezibuněčných prostorů impregnačním médiem.

Následný řízený proces sušení vedl k vysoce homogenní distribuci a fixaci aktivních složek retardéru v celém objemu modifikovaného dřeva. Významným doprovodným efektem byl identifikován synergický vliv černého louhu, který byl využit jako alternativní impregnační médium. Vzhledem k tomu, že se jedná o vedlejší produkt delignifikace dřeva při výrobě celulózy s vysokým obsahem rozpuštěného ligninu, vykazoval tento alkalický roztok velmi dobrý průnik makrostrukturou dýhy.

Působením černého louhu došlo k částečnému narušení ligninové složky v buněčných stěnách dýhy a k jeho následné kopolymeraci s ligninovými komponenty obsaženými v impregnovaném roztoku. Po ukončení impregnačního procesu byly dýhy vysušeny do stavu absolutní suchosti a před následnou fází lepení rekondicionovány na definovanou rovnovážnou vlhkost.

Parametry tlakového režimu impregnace byly nastaveny tak, aby se omezil vznik vnitřních makroskopických trhlin a prasklin. K zachování strukturní celistvosti výrazně přispěly

samotné geometrické dimenze 2 mm dýhy. Ty umožnily, aby se vnitřní napětí vznikající v důsledku bobtnání a sesychání materiálu rozložilo do plochy materiálu, čímž bylo účinně zabráněno rozvoji strukturních deformací.

- Vliv vybraných retardérů hoření v aglomerovaných překližovaných materiálech na rychlost šíření požáru.

Tento stanovený cíl disertační práce byl na základě získaných experimentálních dat a navazujícího matematického modelování splněn ve všech bodech, přičemž dosažené výsledky potvrzují vysokou protipožární účinnost vyvinutých materiálů za definovaných okrajových podmínek při hustotě tepelného toku $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ a variabilní orientaci vzorků.

Při zkoušce laterálního šíření plamene po svislé ploše podle normy ČSN EN ISO 5658-2 prokázaly nejvyšší efektivitu materiálové varianty **5A**, **6A**, **3A** a **4A**, které vykazovaly pouze transientní, krátkodobé zahoření bez rozvoje autonomního plamenného hoření, a po poklesu pod kritickou teplotu tepelného rozkladu došlo k zastavení dalšího šíření plamene.

Primární fyzikální mechanismus retardace spočívá v zásadním zpomalení kinetiky prohřívání dýhových vrstev v pyrolytické fázi, což účinně brání dosažení počáteční teploty hoření, přičemž výzkum zároveň potvrdil významný vliv chemické báze použitého adheziva na celkovou rychlost šíření požáru.

Tyto závěry plně validovala kónická kalorimetrie analýzou parametru *ARHE*, přičemž pokročilý matematický model využívající dvě Weibullové distribuční funkce umožnil exaktně kvantifikovat proměnné procesy hoření a určil modifikaci **5B** jako optimální variantu vykazující 69% snížení modelového ukazatele hořlavosti vůči neupravenému referenčnímu materiálu.

- Vliv vybraných retardérů hoření v aglomerovaném materiálu na mechanické vlastnosti výsledného produktu.

Tento závěrečný stanovený cíl disertační práce byl prostřednictvím destruktivního mechanického testování a pokročilé digitální analýzy obrazu plně splněn. Dosažené výsledky poskytují experimentální oporu pro ověření materiálových vlastností po tepelné expozici.

Výzkum byl primárně zaměřen na stanovení reziduální mechanické pevnosti a zbytkové tuhosti modifikovaných aglomerovaných materiálů na bázi dřeva v závislosti na intenzitě jejich

termické degradace, kdy byly vzorky testovány v pěti různých expozičních stavech včetně neexponované srovnávací reference.

Experimentální data jednoznačně potvrdila pozitivní vliv specifických skupin retardérů a jejich vzájemný synergický efekt v jednotlivých vrstvách materiálu; při zvýšeném tepelném zatížení dosahoval modifikovaný materiál v součinnosti s adhezivem vyšší celkové tuhosti než referenční vzorky.

Tento jev lze spojit s procesem dodatečného polykondenzačního zesíťování a možnou interakcí mezi plynnými i pevnými produkty termického rozkladu retardérů a matricí fenol-formaldehydové pryskyřice. V místech maximální teplotní expozice si tyto inovované materiály zachovávají prokazatelně vyšší zbytkovou tuhost než čistá reference, a to za předpokladu ekvivalentního ohořelého neboli degradovaného průřezu tělesa.

Výzkumem bylo dále prokázáno, že kinetika tvorby a stabilita zuhelnatělé povrchové vrstvy (charu) jsou přímo úměrné specifickému typu použitého retardéru, přičemž i tato parciálně degradovaná krusta si uchovává zbytkovou mechanickou integritu a aktivně se integruje do procesu přenosu vnějšího mechanického zatížení.

Tento klíčový efekt, graficky interpretovaný pomocí relativního procentuálního poklesu zatěžovací síly v jednotlivých pozicích, byl plně validován za využití progresivního bezkontaktního optického systému ARAMIS pro trojrozměrnou analýzu deformací, který exaktně popsal distribuci polí přetvoření v reálném čase. Na základě této komplexní mechanické a optické komparace byly jako optimální identifikovány materiálové varianty **3A**, **4A** a **5A**, které po požární expozici vykazovaly nejvyšší retenci původních mechanických vlastností.

Validace hypotéz

H1: Synergie biogenních a syntetických prekurzorů.

Hypotéza H1 se potvrzuje na základě dat z kónické kalorimetrie (ISO 5660-1). Integrace modifikačního systému kombinujícího biogenní lignin z alkalického černého louhu a syntetická dusíkatá aditiva do vnitřní struktury dýhového materiálu podporuje vznik stabilní karbonizované bariéry se zvýšenou schopností fixace uhlíku v pevné fázi. Tento synergický mechanismus pravděpodobně přispívá k omezení termické degradace a difuze kyslíku

k materiálu, což vedlo k významné redukci průměrné rychlosti uvolňování tepla (*ARHE*) a celkového požárního zatížení (*THR*) v porovnání s nemodifikovaným materiálem.

H2: Termomechanická kompatibilita a post-curing.

Hypotéza H2 se potvrzuje na základě výsledků mechanických zkoušek po teplotním zatížení. Přítomnost specificky navržených retardérů v lepené spáře nevedla k výraznému omezení polykondenzačních procesů fenol-formaldehydových adheziv. Naopak lze předpokládat, že vlivem působícího teplotního gradientu mohlo docházet k podpoře dodatečného síťování, post-curingu. Tento efekt může přispívat k zachování strukturální integrity dýhového materiálu a k nárůstu jeho reziduální ohybové tuhosti, ověřené třibodovým ohybovým testem po prodělané termické expozici.

H3: Technologická integrabilita.

Hypotéza H3 byla potvrzena. Experimentálně bylo ověřeno, že navržené modifikační systémy jsou technologicky slučitelné se standardními výrobními cykly aglomerovaných materiálů. Celý proces laboratorní přípravy vzorků byl, s výjimkou aplikace retardérů, inspirován a modelován podle reálné tovární produkce překližek, což podporuje přenositelnost výsledků do praxe. Výsledné kompozity vykazují normou požadovanou adhezi a vnitřní soudržnost, přičemž zavedení modifikace nevyžaduje zásadní úpravu stávajícího strojního vybavení či technologických linek.

7.1 Přínos pro praxi

Předkládaná disertační práce je přínosem jak pro oblast průmyslové výroby aglomerovaných materiálů se zvýšenou požární odolností, tak i pro oblast projektování a realizace dřevostaveb. V současné architektonické a stavební praxi je stále zažita míra nedůvěry v širším užití dřeva a materiálů na jeho bázi ve vícepodlažních a veřejných objektech.

Projektanti a specialisté požární bezpečnosti staveb často narážejí na přísný legislativní rámec a nedostatek podkladů o chování moderních materiálů na bázi dřeva při požáru. To vede k tomu, že se již ve fázi návrhu raději uchylují k tradičním, dlouhodobě ověřeným, avšak z ekologického hlediska méně příznivým materiálům. Mnoha inovativním materiálům

na přírodní bázi doposud chybělo kvantitativní zhodnocení požárně-technických vlastností. To komplikovalo jejich certifikaci a legální uvedení na jednotný evropský trh, kde v pokročilých modelech šíření požáru dosavadní řešení legislativně nevyhovovala.

Snahou této práce je poskytnout možné řešení, které by přineslo zhodnocení účinnosti navržených modifikačních systémů a detailně by popsalo kinetiku jejich chování během termické degradace a šíření požáru. Pro praktiky z oblasti požárního inženýrství představuje práce významný přínos v tom, že poskytuje rozsáhlá empirická data, jako jsou parametry rychlosti uvolňování tepla a vývinu kouře, která lze přímo implementovat do matematických modelů simulace požáru a výpočtů evakuačních dob. Výstupy práce tak mohou sloužit jako spolehlivý podklad pro bezpečné navrhování únikových cest u typologicky náročných objektů.

Z hlediska výrobců vrstvených aglomerovaných materiálů, zejména překližovaných desek, pak hlavní přínos práce spočívá ve validaci ekologicky šetrnějších retardérů hoření a v ověření jejich reálné technologické integrace do stávajících procesů. Výzkum prokázal, že navržený způsob hloubkové impregnace jednotlivých dřív před jejich sesazením a lisováním představuje technologicky výhodné řešení. Tento postup lze implementovat do stávajících výrobních struktur formou zařazení specializované impregnační větve, aniž by byla vyžadována radikální a finančně náročná rekonfigurace celé technologické linky.

Vědecká hodnota a aplikační potenciál práce jsou navíc podloženy klíčovým faktorem, že metodika přípravy vzorků byla, s výjimkou aplikace samotné modifikace, přímo inspirována a modelována podle reálných parametrů průmyslové produkce výrobního závodu ALFA společnosti Wotan Forest, a.s. Práce tak nepřináší pouze teoretické modely, ale verifikuje účinnost konkrétních materiálových skladeb na základě exaktních experimentálních měření.

Předložená empirická data, prokazující zvýšenou požární odolnost při současném zachování normativních požadavků na adhezi a vnitřní soudržnost materiálu, poskytují průmyslovým partnerům spolehlivý základ pro tvorbu ekonomických modelů. Výrobci jsou tak schopni přesně predikovat přidanou hodnotu finálního produktu a exaktně vyhodnotit finanční návratnost investic spojených s optimalizací výrobního procesu.

7.2 Přínos pro vědu

Z hlediska vědeckého přínosu může řešená problematika v rámci předkládané disertační práce poskytnout inovativní metodický přístup k matematickému popisu a interpretaci dat naměřených pomocí kónické kalorimetrie. Výzkum představuje návrh aplikace matematického modelu založeného na kombinaci dvou Weibullových funkcí. Tento specifický postup umožňuje popsat a částečně oddělit kinetiku povrchového hoření od hoření vnitřních vrstev materiálu, kvantifikovat jejich vzájemnou synergii a charakterizovat přesun energetického toku mezi těmito dvěma fázemi termické degradace.

Dosavadním zásadním problémem v oblasti modelování požární odolnosti dřevěných prvků je kritický nedostatek spolehlivých dat, která by umožnila ověření a kalibraci výpočetních algoritmů. Současně využívané komerční softwary pracují zpravidla na bázi obecných fyzikálních známých zákonů, jako je prostý prostup a šíření tepla homogenním materiálem či jeho tabulková hořlavost. Takové konvenční přístupy jsou však pro moderní vrstvené materiály na bázi dřeva zcela nedostačující. U těchto pokročilých materiálů totiž majoritní objem tvoří standardní dřevní hmota. Malé přídavky retardérů hoření však zásadním způsobem mění celkovou dynamiku hoření, což stávající programy nedokážou věrohodně podchytit.

Právě implementace navrženého dvoufunkčního matematického modelu například do programovacího prostředí Python software otevírá zcela nové možnosti. Umožňuje vytvořit dynamické funkce, které v čase a pod specifickým tepelným zatížením simulují proces hoření s nesrovnatelně vyšší věrohodností, než poskytují dosavadní řešení. Získaná empirická data z kalorimetrických zkoušek zde slouží jako klíčové vstupní a validační informace, díky nimž se model chová v rámci časové osy reálně. To má zásadní význam například při výpočtech a modelování redukovaného průřezu prvků, který je způsoben postupným odhoříváním a zuhelnatěním jednotlivých vrstev materiálu. Potenciálně značnou vědeckou hodnotou práce je navíc skutečnost, že tyto termické modely lze přímo provázet s mechanickými daty, která jsou pevně vázána na teplotní profil v jednotlivých vrstvách kompozitu. Na základě této korelace lze matematický model kontinuálně zpřesňovat. Disertační práce tak poskytuje ucelenou, komplexně provázanou datovou základnu, která rozšiřuje dosavadní poznatky oboru a definuje směr pro budoucí výzkum. Ten by měl koncepčně směřovat k efektivnímu programování procesů hoření například v prostředí Python s přímým zřetelem na mechanickou únosnost a stabilitu tepelně namáhaných konstrukcí, což je zcela nezbytný předpoklad pro bezpečné navrhování moderních výškových dřevostaveb na bázi dřeva.

Seznam literatury

- Abou Rjeily, M.,** Gennequin, C., & Randrianalisoa, J. H. (2025). Biomass pyrolysis to produce hydrogen, methane, carbon monoxide, carbon dioxide, oil and char: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 23(6), 1473-1541. <https://doi.org/10.1007/s10311-025-01867-y>
- Adamčík, L.,** Kminiak, R., & Schmidtová, J. (2023). Measurement of the roughness of the sanded surface of beech wood with the profile measurement software of the keyence vhx-7000 microscope. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, 65(1), 73-86.
- Adeniran, A. D.,** Oyelami, S., Okedere, O. B., Adeboye, B. S., & Oyewo, A. T. (2024). Pyrolysis of wood for charcoal production: A basic review of existing models. *Unizik Journal of Technology, Production and Mechanical Systems*, 4(1), 137-142.
- Alcántara, F. B.,** Ramírez, J. C., & Gómez, J. C. (2025). Evaluation of reaction-to-fire behaviour of wood chipboard: A comparative study of treatments and coatings. *Materiales de Construcción*, 75(360), e395-e395. <https://doi.org/10.3989/mc.2025.410325>
- Alvarado Flores, J. J.,** Alcaraz Vera, J. V., Ávalos Rodríguez, M. L., López Sosa, L. B., Rutiaga Quiñones, J. G., Pintor Ibarra, L. F., & Aguado Zarraga, R. (2022). Analysis of pyrolysis kinetic parameters based on various mathematical models for more than twenty different biomasses: a review. *Energies*, 15(18), 6524, 1-19. <https://doi.org/10.3390/en15186524>
- Amel, L.,** Abdellatif, Z., & Daniel, Q. (2016). Determination of acoustic parameters of bio-based materials distended for building: application case to Aleppo pine wood cork and their composites. *Wood research*, 61(1), 25-34.
- Antonović, A.,** Jambrečković, V., Kljak, J., Španić, N., & Medved, S. (2010). Influence of Urea-Formaldehyde Resin Modification with Liquefied Wood on Particleboard Properties. *Wood Industry/Drvna Industrija*, 61(1), 5-14.
- Ashori, A.,** Ayilimis, N., & Heydari, V. (2023). Enhancing interfacial adhesion through coupling agent incorporation in plywood/plastic waste composite

- materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 127, 103513, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103513>
- Balankin, A. S.** (2020). Fractional space approach to studies of physical phenomena on fractals and in confined low-dimensional systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 132, 109572, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.109572>
- Bartlett, A. I., Hadden, R. M., Hidalgo, J. P., Santamaria, S., Wiesner, F., Bisby, L. A., & Lane, B.** (2017). Auto-extinction of engineered timber: Application to compartment fires with exposed timber surfaces. *Fire Safety Journal*, 91, 407-413. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.050>
- Baysal, E., Altinok, M., Colak, M., Ozaki, S. K., & Toker, H.** (2007). Fire resistance of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) treated with borates and natural extractives. *Bioresource Technology*, 98(5), 1101-1105. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.04.023>
- Belhadj, S., Lacoste, C., Sonnier, R., & Corn, S.** (2024). Effect of Accelerated Aging Weathering on Fire and Mechanical Properties of Plywood. In *International Scientific Conference on Woods & Fire Safety*, 71-80. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Bernaczyk, A., Tröger, J., Niemz, P., Rößler, M., Hübner, A., Wagenführ, A., & Hänsel, A.** (2026). Influence of the mechanical wood surface preparation on the bonding quality of European beech, Douglas fir, and European larch glued with phenol-resorcinol-formaldehyde (PRF) and one-component polyurethane (1C-PUR) adhesives. *Wood Material Science & Engineering*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/17480272.2026.2666651>
- Biernacki, J. M., & Beall, F. C.** (1996). Acoustic monitoring of cold-setting adhesive curing in wood laminates: effect of clamping pressure and detection of defective bonds. *Wood and fiber science*, 7-14. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0143-7496(95)00041-0)
- Blattner R., Ferrier R. J.** (1985). Effects of iron, copper, and chromate ions on the oxidative degradation of cellulose model compounds. *Carbohydrate research*. 138: 73-82. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(85\)85224-1](https://doi.org/10.1016/0008-6215(85)85224-1)

- Çamlıbel, O.,** Aydın, M., & Koç, E. (2024). Influences of oak utilization on the medium density fiberboard properties. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 26, 1-12. <http://dx.doi.org/10.22320/s0718221x/2024.21>
- Cook, D.R.** (2003). Making the connection; corrosive effects of new wood preservatives on steel fasteners and connections. *Structural Engineer*, 5(3), 28-31.
- Crawford, D.M.;** Woodward, B.M.; Hatfield, C.A. (2002). Comparison of wood preservative in stake tests: 2000 Progress Report. Research Note FPL–RN–02. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, *Forest Products Laboratory*, 2002, 7, 1-123. <https://doi.org/10.2737/FPL-RN-2>
- Dai, X.,** Alam, N., Liu, C., Nadjai, A., Rush, D., & Welch, S. (2024). “Scaling-up” fire spread on wood cribs to predict a large-scale travelling fire test using CFD. *Advances in Engineering Software*, 189, 103589. 1-22 <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2023.103589>
- Dan, H. C.,** Wen, X., Chen, J., Cao, W., & Jing, H. (2023). A molecular dynamics approach to the interfacial characteristics between melamine formaldehyde resin and paving asphalts. *Construction and Building Materials*, 365, 130051, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130051>
- Dunky, M.** (2003). 2 Chemistry of Adhesives. COST Action E13, 3.
- Ebnesajjad, S., & Ebnesajjad, C.** (2013). *Surface treatment of materials for adhesive bonding*. William Andrew.
- Ebrahimi, A.,** Pardal, F., Jarnoux, M., Defoin, M., Loiola, L. M. D., Ragaert, K., & Fiorio, R. (2025). The impact of polyurethane adhesives on the recyclability of polyethylene-based laminated films. *Polymer Testing*, 109010, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.109010>
- Emberley, R.,** Putynska, C. G., Bolanos, A., Lucherini, A., Solarte, A., Soriguer, D., & Torero, J. L. (2017). Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests. *Fire Safety Journal*, 91, 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.024>
- Essawy, H. A.,** Moustafa, A. A. B., & Elsayed, N. H. (2009). Improving the performance of urea-formaldehyde wood adhesive system using dendritic poly (amidoamine) s

- and their corresponding half generations. *Journal of Applied Polymer Science*, 114(2), 1348-1355. <https://doi.org/10.1002/app.30696>
- Fang, Y.**, Yin, X., Cui, P., Wang, X., Zhuang, K., Ding, Z., & Xing, F. (2021). Properties of magnesium potassium phosphate cement-expanded perlite composites applied as fire resistance coating. *Construction and Building Materials*, 293, 123513, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123513>
- Fašalek, A.**, Malzl, L., Konnerth, J., van Herwijnen, H. W., Stroobants, J., Moser, J., & Pramreiter, M. (2025). Evaluation of bondability of different wood species using adhesives for wood-based panels. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 104230, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.104230>
- Favis, J.**, Balboni, B. M., & Wessels, C. B. (2024). Effect of wood moisture content and adhesive open time on the adhesion strength of wet bonded *Pinus radiata* wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82(2), 557-560. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02050-w>
- Fehrmann, J.**, Belleville, B., Ozarska, B., Gutowski, W. V. S., & Wilson, D. (2023). Influence of particle granulometry and panel composition on the physico-mechanical properties of ultra-low-density hemp hurd particleboard. *Polymer Composites*, 44, 7363-7383. <https://doi.org/10.1002/pc.27631>
- Gao, Q.**, Lin, Q., Huang, Y., Hu, J., & Yu, W. (2023). High-performance wood scrimber prepared by a roller-pressing impregnation method. *Construction and Building Materials*, 368, 130404. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130404>
- Gao, S.**, Liu, Y., Wang, C., Chu, F., Xu, F., & Zhang, D. (2020). Synthesis of lignin-based polyacid catalyst and its utilization to improve water resistance of urea-formaldehyde resins. *Polymers*, 12(1), 175. 1-12. <https://doi.org/10.3390/polym12010175>
- Gao, X.**, Zhang, A., Li, S., Sun, B., & Zhang, L. (2016). The resistance to high temperature of magnesia phosphate cement paste containing wollastonite. *Materials and Structures*, 49, 3423-3434. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0729-9>

- Gao, Z.,** Wang, W., Zhao, Z., & Guo, M. (2011). Novel whey protein-based aqueous polymer-isocyanate adhesive for glulam. *Journal of Applied Polymer Science*, 120(1), 220-225. <https://doi.org/10.1002/app.33025>
- Ghazal, H.,** Saad, F., Hegazy, B. M., Sedik, A., & Hassabo, A. G. (2023). Polyurethane and its application in textile industry. *Letters in Applied NanoBioScience*, 13(1), 1-28. <https://doi.org/10.33263/LIANBS131.008>
- Gonçalves, C.,** Pereira, J., Paiva, N. T., Ferra, J. M., Martins, J., Magalhães, F. D., & Carvalho, L. (2020). A study of the influence of press parameters on particleboards' performance. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78, 333-341. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01507-y>
- Graeser, S.,** Postl, W., Bojar, H. P., Berlepsch, P., Armbruster, T., Raber, T., & Walter, F. (2008). Struvite-(K), $\text{KMgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, the potassium equivalent of struvite—a new mineral. *European Journal of Mineralogy*, 20(4), 629-633. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1810>
- Gržan, T.,** Grieco, L., Živković, V., & Mihulja, G. (2023). UV irradiation of wood surface: Bonding properties. *Polymers*, 15(11), 2552. <https://doi.org/10.3390/polym15112552>
- Guizhen, F.;** Yaoxing, S.; Lianjie, S.; & Guangsheng, CH. (2000). The dimensional stability and resistance decay of modified wood with fire retardant DPB. *Journal of Northeast Forestry University*, 2000-04, 57-59.
- Güntekin, E.,** & Uysal, M. (2025). Experimental and numerical analysis of sandwich panels made of different core materials with plywood facing. *Drvna industrija*, 76(1), 47-55. <https://doi.org/10.5552/drvind.2025.0201>
- Hadden, R. M.,** Bartlett, A. I., Hidalgo, J. P., Santamaria, S., Wiesner, F., Bisby, L. A., & Lane, B. (2017). Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics. *Fire Safety Journal*, 91, 480-489. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.074>
- Hill D. J.,** Le T., Darveniza M., & Saha T. (1995). *A study of degradation of cellulosic insulation materials in a power transformer, part 1. Molecular weight study of cellulose insulation paper.* In 17 Polymer Degradation and Stability. 79-87. ISSN: 0141-3910. 1995

- Holthuis, J.J.M.,** van Oort, W.J., Römken, F.M.G.M., Renema, J., & Zuman, P. (1985). Electrochemistry of podophyllotoxin derivatives. Part 1. Oxidation mechanism of etoposide (VP-16-213). *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 184, 317-329. [https://doi.org/10.1016/0368-1874\(85\)85536-2](https://doi.org/10.1016/0368-1874(85)85536-2)
- Horacek, H.,** & Grabner, R. (1996). Advantages of flame retardants based on nitrogen compounds. *Polymer Degradation and Stability*, 54(2–3), 205-215. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(96\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(96)00045-6)
- Horrocks, A. R.,** & Price, D. (2008). *Advances in Fire Retardant Materials*. Woodhead Publishing.
- Hrázský, J.,** & Král, P. (2005). Assessing the bending strength and modulus of elasticity in bending of exterior foiled plywoods in relation to their construction. *Journal of Forest Science*, 51(2), 77-94. <https://doi.org/10.17221/4546-JFS>
- Huang, L.,** Sun, W., Shuai, L., Luo, X., & Liu, J. (2023). Lignocelluloses-Based Furan-Acetone Adducts as Wood Adhesives for Plywood Production. *Polymers*, 15(4), 996. <https://doi.org/10.3390/polym15040996>
- Chase, M.W.** (1998). NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, Part I. AI-Co. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 9, 1-1951.
- Chuchala, D.,** Orlowski, K. A., Hiziroglu, S., Wilmanska, A., Pradlik, A., & Mietka, K. (2023). Analysis of surface roughness of chemically impregnated Scots pine processed using frame-sawing machine. *Wood Material Science & Engineering*, 18(5), 1-7. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2221655>
- Jahan, T.,** Lekhak, B., Verma, A. K., Dubey, A., & Bhattacharya, T. K. (2022). Preparation of phenol-formaldehyde resin modified with phenol-rich pine needle pyrolysis oil and assessment of bonding strength. *International Wood Products Journal*, 13(3), 148-155. <https://doi.org/10.1080/20426445.2022.2061254>
- Jang, E. S.,** Kang, C. W., & Park, H. J. (2024). Investigating the sound absorption performance of circular and slotted perforated birch (*Betula platyphylla*) plywood as interior building materials. *BioResources*, 19(1), 1517-1525. <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.1517-1525>
- Jia, Y.,** Luo, B., Lee, S. H., Huang, H., Wu, Z., Zhou, B., & Zhang, J. (2024). Facile preparation of high-performance plywood adhesive from gelatinized corn starch

- crosslinked with ammonium dihydrogen phosphate. *International Journal of Biological Macromolecules*, 256, 128548. 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128548>
- Kim, S., & Kim, H. J.** (2005). Effect of addition of polyvinyl acetate to melamine-formaldehyde resin on the adhesion and formaldehyde emission in engineered flooring. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25(5), 456-461.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.01.001>
- Kojima, Y., Ono, T., Murayama, K., & Kobori, H.** (2025). Evaluation of the mechanical and physical properties of plywood adhesively bonded with cellulose nanofiber. *Forest Products Journal*, 75(3), 251-257.
<https://doi.org/10.13073/FPJ-D-24-00053>
- Kopylova, Y. O., Volkov, S. N., Aksenov, S. M., & Bubnova, R. S.** (2026). Synthesis and crystal structure of a new mixed NH_4/Cs borate $(\text{NH}_4)_{0,858}/\text{Cs}_{0,142} [\text{B}_5\text{O}_7(\text{OH})_2] \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$. *Journal of Structural Chemistry*, 67(4), 796-805.
<https://doi.org/10.1134/S0022476626040086>
- Kuklík, P., & Charvátová, M.** (2015). The behaviour of special OSB boards under fire conditions, The influence of OSB board's fire coating on the fire resistance of light timber frame assemblies. *Applications of Structural Fire Engineering*, 1-6.
<https://doi.org/10.14311/asfe.2015.044>
- Kurek, J., Świdarska, E., & Szymanowski, K.** (2024). Tool wear classification in chipboard milling processes using 1-D CNN and LSTM based on sequential features. *Applied Sciences*, 14(11), 4730, 1-18.
<https://doi.org/10.3390/app14114730>
- Lacey, C. E., VanderKam, K., Sundaresan, S., & Mueller, M. E.** (2024). Data-based instantaneous conditional progress variable dissipation rate modeling for turbulent premixed combustion. *Combustion and Flame*, 259, 113139. 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.113139>
- Lei, H., & Frazier, C. E.** (2015). Curing behavior of melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 62, 40-44.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.06.013>

- Li, D.,** Yu, L., Li, L., Liang, J., Wu, Z., Xu, X., & Gong, F. (2023). Melamine–urea–formaldehyde resin adhesive modified with recycling lignin: Preparation, structures and properties. *Forests*, 14(8), 1625, 1-16. <https://doi.org/10.3390/f14081625>
- Li, J.,** Han, X., Yao, S., Guo, D., & Chu, F. (2025). Reinforcing flame retardancy, dimensional stability, and high strength of woods for structural applications through surface densification and chemical modification. *Industrial Crops and Products*, 223, 120175, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120175>
- Li, J.,** Li, L., Guo, Y. F., Zhang, S. S., & Deng, T. L. (2016). Applications of calorimetry in the field of thermodynamic properties of the aqueous borate systems. In *2nd 2016 International Conference on Sustainable Development (ICSD 2016)*, 519-522. Atlantis Press.
- Li, T.,** Zhang, B., Jiang, S., Zhou, X., Du, G., Wu, Z., & Yang, L. (2020). Novel highly branched polymer wood adhesive resin. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(13), 5209-5216. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07732>
- Li, X.,** Gao, Q., Xia, C., Li, J., & Zhou, X. (2019). Urea formaldehyde resin resultant plywood with rapid formaldehyde release modified by tunnel-structured sepiolite. *Polymers*, 11(8), 1286, 1-11. <https://doi.org/10.3390/polym11081286>
- Liang, X.,** Gu, X., Hsu, M. M. P., He, Y., Zhang, R., Cai, C., & Wang, Z. (2023). Design and development of composite plywood that integrates fire resistance, water resistance and wear resistance. *Journal of Renewable Materials*, 11(5). 2333-2344. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.026137>
- Lille, H.,** Kiviste, M., Telling, R., Leppik, T., Virro, I., & Kask, R. (2022). Evaluation of some mechanical and physical properties of ‘Oriented Strand Board (OSB/3)’ following cyclic accelerated aging tests. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(3), 731-740. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01803-9>
- Lins, D.,** Franke, S., Voß, M., & Wirries, J. (2024). Low-temperature adhesive curing in timber engineering: about the relationship between curing kinetics and mechanical properties. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 134, 103815, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103815>

- Liu, J., & Fischer, E. C.** (2022). Review of large-scale CLT compartment fire tests. *Construction and Building Materials*, 318, 126099, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126099>
- Loureiro, P.E.G.,** Fernandes, A.J.S., Furtado, F.P., Carvalho, M.G.V.S., Evtuguin, D.V. (2011). UV-resonance Raman micro-spectroscopy to assess residual chromophores in cellulosic pulps. *Journal of Raman Spectroscopy*, 42(5), 1039-1045. <https://doi.org/10.1002/jrs.2816>
- Lowden, L. A., & Hull, T. R.** (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*, 2(4), 1-19. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4>
- Lunguleasa, A.,** Dumitrascu, A. E., & Ciobanu, V. D. (2020). Comparative studies on two types of osb boards obtained from mixed resinous and fast-growing hard wood. *Applied Sciences*, 10(19), 6634, 1-15. <https://doi.org/10.3390/app10196634>
- Lyutyy, P.,** Bekhta, P., Protsyk, Y., & Gryc, V. (2024). Hot-pressing process of flat-pressed wood–polymer composites: Theory and experiment. *Polymers*, 16(20), 2931, 1-10. <https://doi.org/10.3390/polym16202931>
- Ma, Y.,** Kou, Z., Hu, Y., Zhou, J., Bei, Y., Hu, L., & Zhou, Y. (2023). Advances in research into bio-based adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 126, 103444, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103444>
- Masoumi, A.,** Satir, E., Adhikari, S., Hindman, D., Bond, B., & Zink-Sharp, A. (2024). Comparison of microscopy and quality control testing to examine the durability of adhesive bondline in cross-laminated timber. *Journal of Building Engineering*, 86, 108958. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108958>
- Mastela, L. D. C.,** Segundinho, P. G. D. A., Gonçalves, F. G., de Souza, C. G. F., Lahr, F. A. R., Minini, D., & Araujo, C. P. D. (2025). The application of structural adhesives in glulam beams: A Comparative study. *Forests*, 16(9), 1421. 1-15. <https://doi.org/10.3390/f16091421>
- Maturana, J. C.,** Guindos, P., Lagos, J., Arroyave, C., Echeverría, F., & Correa, E. (2023). Two-step hot isostatic pressing densification achieved non-porous fully-

- densified wood with enhanced physical and mechanical properties. *Scientific Reports*, 13(1), 14324, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41342-8>
- McNamee, R.**, Zehfuss, J., Bartlett, A. I., Heidari, M., Robert, F., & Bisby, L. A. (2021). Enclosure fire dynamics with a cross-laminated timber ceiling. *Fire and Materials*, 45(7), 847-857. <https://doi.org/10.1002/fam.2904>
- Mitchell, H.**, Kotsovinos, P., Richter, F., Thomson, D., Barber, D., & Rein, G. (2023). Review of fire experiments in mass timber compartments: Current understanding, limitations, and research gaps. *Fire and Materials*, 47(4), 415-432. <https://doi.org/10.1002/fam.3121>
- Naumovski, L.**, Capuder, M., Sandak, J., & Azinović, B. (2025). Influence of surface preparation and surface topography on tensile shear strength of polyurethane adhesively bonded beech wood single-lap joints: a finite element method approach. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83(4), 139, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02285-1>
- Nemli, G.**, & Öztürk, İ. (2006). Influences of some factors on the formaldehyde content of particleboard. *Building and Environment*, 41(6), 770-774. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.03.016>
- Neyses, B.**, Scharf, A., & Sandberg, D. (2023). Continuous densification of wood with a belt press: how knot features impact the densification outcome. *Wood Material Science & Engineering*, 18(4), 1587-1596. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2228278>
- Nguyen, D. V.**, Nguyen, T. T. H., Kubota, S., & Suzuki, S. (2022). Effects of size and type of raw material on temperature and vapour pressure behaviour of wood-based panels during hot-pressing. *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 702-711. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1931439>
- Nociar, M.**, Pipíška, T., Král, P., Grbec, S., & Šernek, M. (2024). Effect of the percentage of MUF adhesive coverage on shear strength when bonding different wood species. *BioResources*, 19(3), 5672, 5672-5684. <https://doi.org/10.15376/biores.19.3.5672-5684>
- Pandey K. K.**, Chauhan, S.S., & Aggarwal, P.K. (1998). Reaction of wood with inorganic salts. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 56, 412-415.

- Park, H.,** Jeong, T., Yeo, S., Nguyen, D. V., Yoon, S., & Kang, S. (2026). Effect of pressure impregnation with a boron-phenolic composite flame retardant on the combustion performance and mechanical properties of plywood. *BioResources*, 21(1), 2047-2057. <https://doi.org/10.15376/biores.21.1.2047-2057>
- Pasco, M.F., & Suckling, I.D.** (1998). Chromophore changes during oxygen delignification of radiata pine kraft pulp. *Appita Journal*, 51(2), 138-146.
- Pizzi, A.** (2003). Melamine-formaldehyde adhesives. In A. Ecole, *Handbook of Adhesive Technology* (2 vyd., ročník 2, s. 22-30). Taylor & Francis Group, LLC.
- Pizzi, A.** (2016). Wood products and green chemistry. *Annals of Forest Science* 73, 185-203. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0448-3>
- Pradeep, S. V.,** Kandasubramanian, B., & Sidharth, S. (2023). A review on recent trends in bio-based pressure sensitive adhesives. *The Journal of Adhesion*, 99(14), 2145-2166. <https://doi.org/10.1080/00218464.2023.2176761>
- Przybyś-Malaczek, A.,** Szymanowski, K., & Kurek, J. (2024). Impact of signal features on machine learning-based tool condition classification in the milling chipboard process. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2024(5), 294-297. <https://doi.org/10.15199/48.2024.05.57>
- Ren, X.,** Meng, J., Moore, A. M., Chang, J., Gou, J., & Park, S. (2014). Thermogravimetric investigation on the degradation properties and combustion performance of bio-oils. *Bioresource technology*, 152, 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.028>
- Richter, F., & Rein, G.** (2020). A multiscale model of wood pyrolysis in fire to study the roles of chemistry and heat transfer at the mesoscale. *Combustion and Flame*, 216, 316-325. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.02.029>
- Rodríguez, G. E.,** Bustos Ávila, C., & Cloutier, A. (2024). Physical and mechanical properties of fiberboard made of MDF residues and phase change materials. *Forests*, 15(5), 802, 1-16. <https://doi.org/10.3390/f15050802>
- Ružiak, I.,** Igaz, R., Krišťák, L., Réh, R., Mitterpach, J., Očkajová, A., & Kučerka, M. (2017). Influence of urea-formaldehyde adhesive modification with beech bark on

- chosen properties of plywood. *BioResources*, 12(2), 3250-3264.
<https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3250-3264>
- Sedira, N.** (2017). A review on mineral waste for chemical-activated binders: mineralogical and chemical characteristics. *Journal of Mining Science*, 24, 29-58.
<https://doi.org/10.5277/msc17240>
- Sevastyanova, O.; Li, J.; Gellerstedt, G.** (2006). On the reaction mechanism of the thermal yellowing of bleached chemical pulps. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 21(2), 188-192. <https://doi.org/10.3183/2006-21-01>
- Shamooni, A., Cuoci, A., Faravelli, T., & Sadiki, A.** (2018). Prediction of combustion and heat release rates in non-premixed syngas jet flames using finite-rate scale similarity based combustion models. *Energies*, 11(9), 2464, 1-20.
<https://doi.org/10.3390/en11092464>
- Shao, C., Jiang, M., Zhang, J., Zhang, Q., Han, L., & Wu, Y.** (2023). Construction of a superhydrophobic wood surface coating by layer-by-layer assembly: Self-adhesive properties of polydopamine. *Applied Surface Science*, 609, 155259. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155259>
- Shi, L., Hu, C., Zhang, W., & Lin, X.** (2023). Effect of hot-pressing and hydrothermal parameters on recycled wood particles and particleboards. *Wood Material Science & Engineering*, 18(5), 1741-1748.
<https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2186262>
- Shirmohammadli, Y., Pizzi, A., Raftery, G. M., & Hashemi, A.** (2023). One-component polyurethane adhesives in timber engineering applications: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 123, 103358, 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103358>
- Silva, J., Marques, J., Gonçalves, I., Brito, R., Teixeira, S., Teixeira, J., & Alvelos, F.** (2022). A systematic review and bibliometric analysis of wildland fire behavior modeling. *Fluids*, 7(12), 374. <https://doi.org/10.3390/fluids7120374>
- Singh, N., Rana, A., & Badhotiya, G. K.** (2023). *Adhesive systems used for particleboards manufacturing-Review*. In AIP Conference Proceedings, 2521(1). AIP Publishing.

- Slabohm, M.,** Mai, C., & Militz, H. (2022). Bonding acetylated veneer for engineered wood products – a review. *Materials*, 15 (10), 3665, 1-9. <https://doi.org/10.3390/ma15103665>
- Sonowal, J.,** & Gogoi, P.K. (2010). Dimensional stability, thermal degradation and termite resistant studies of chemically treated wood. *International Journal of Chemistry*, 2(2), 218-225. <https://doi.org/10.5539/ijc.v2n2p218>
- Stoliarov, S. I.,** & Ding, Y. (2023). Pyrolysis model parameterization and fire growth prediction: the state of the art. *Fire Safety Journal*, 140, 103905, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103905>
- Sugama, T.,** & Kukacka, L. E. (1983). Characteristics of magnesium polyphosphate cements derived from ammonium polyphosphate solutions. *Cement and Concrete Research*, 13(4), 499-506. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(83\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(83)90008-X)
- Sun, L.,** Guo, Q., Yang, F., Wei, K., Sun, S., Liu, H., & Li, Y. (2026). Pt single atoms anchored on borate anion-intercalated CoP nanoflower for enhanced hydrogen generation kinetics of NaBH₄ hydrolysis. *Journal of Alloys and Compounds*, 186404, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.186404>
- Taiwo, A. S.,** Ayre, D. S., Khorami, M., & Rahatekar, S. S. (2025). Development of fiber cement boards using recycled jute fibers for building applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 37(1), 04024453, 1-12. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-18084>
- Tang, R.,** Fan, L., Yu, Z., & Zhang, Y. (2025). Mechanisms and properties for sustainable fiberboard recycling via simultaneous utilization of residual urea-formaldehyde resin and lignin. *Polymer Composites*, 47(10), 8976-8989. <https://doi.org/10.1002/pc.70734>
- Tawfik, M. W.,** Ali, A. M., & Beshir, M. (2026). Timber pyrolysis in compartment Fires: A review of current CFD pyrolysis submodels limitations and atomistic-scale simulations capabilities and limitations. *Fire Safety Journal*, 104714, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2026.104714>
- Teleman, T.,** Hausalo, T., Tenkanen, M., & Vuorinen, T. (1996). Identification of the acidic degradation products of hexenuronic acid and characterization of

- hexenuronic acid-substituted xylooligosaccharides by NMR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 280(2), 197-208. [http://doi.org/10.1016/0008-6215\(95\)00309-6](http://doi.org/10.1016/0008-6215(95)00309-6)
- Theander, O., & Nelson, D.A.** (1988). Aqueous, high-temperature transformation of carbohydrate relative to utilization of biomass. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*, 46, 273-326. [https://doi.org/10.1016/S0065-2318\(08\)60169-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2318(08)60169-9)
- Thoemen, H., Irle, M., & Sernek, M.** (2010). Wood-based panels: An introduction for specialists. In H. Thoemen, M. Irle, & M. Sernek (Eds.), *Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists* (s. 1-94). Brunel University Press.
- Tierz, A., Iparraguirre, M. M., Alfaro, I., González, D., Chinesta, F., & Cueto, E.** (2025). On the feasibility of foundational models for the simulation of physical phenomena. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 126(6), e70027, 1-14. <https://doi.org/10.1002/nme.70027>
- Toldy, A., Poór, D. I., Szolnoki, B., Geier, N., & Pomázi, Á.** (2025). Synergistic flame retardancy of carbon fibre-reinforced polyimine vitrimer composites via vitrimer-based intumescent coating. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 198, 109135, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109135>
- Tribulová, T.** (2016). *Changes in structure and properties of chemically treated wood*. Ph.D. Thesis. Zvolen: Technical university of Zvolen, 181.
- Trociński, A., Dziurka, D., Thomas, M., & Mirski, R.** (2024). Physico-mechanical characteristics of gypsum–fiber boards manufactured with hydrophobically impregnated fibers. *Materials*, 17(18), 4555. <https://doi.org/10.3390/ma17184555>
- Tu, Y., Liang, J., Yu, L., Wu, Z., Xi, X., Zhang, B., & Xiao, G.** (2023). Effects of plasma treatment on the surface characteristics and bonding performance of *Pinus massoniana* wood. *Forests*, 14(7), 1346, 1-15. <https://doi.org/10.3390/f14071346>
- Tuerp, D., & Bruchmann, B.** (2015). Dendritic polyurea polymers. *Macromolecular rapid communications*, 36(2), 138-150. <https://doi.org/10.1002/marc.201400510>

- Valchev, I.,** Yordanov, Y., Savov, V., & Antov, P. (2022). Optimization of the hot-pressing regime in the production of eco-friendly fibreboards bonded with hydrolysis lignin. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 66(1), 125-134. <https://doi.org/10.3311/PPch.18284>
- Vallejos, S.,** Trigo-López, M., Sardon, H., González-Martín, J. M., González-Moreno, S., & García, J. M. (2023). Metal-free organocatalysts for high hydrolytic stability single component polyurethane adhesives and their application in decorative insulation facades manufacturing. *Construction and Building Materials*, 400, 132643, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132643>
- Wagh, A. S.** (2016). Chemically bonded phosphate ceramics: twenty-first century materials with diverse applications. *Elsevier*, 1. <http://doi.org/10.1016/C2014-0-02562-2>
- Wang, X.,** Fleischmann, C., & Spearpoint, M. (2020). Applying the FDS pyrolysis model to predict heat release rate in small-scale forced ventilation tunnel experiments. *Fire safety journal*, 112, 102946, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102946>
- Wang, X.,** Xing, W., Song, J., & Shen, S. (2025). Multi-scale structure, mechanical behavior, and intelligence of wood-based materials. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 55(12), 124601, 1-29. <https://doi.org/10.3390/nano12071139>
- Wang, X.,** Yuan, Z., Pan, X., Li, J., Tan, Q., & Ren, J. (2023). Eco-friendly polyurethane reactive hot-melt adhesive derived from poly (ϵ -caprolactone-co-lactic acid) diols. *ACS Applied Polymer Materials*, 5(9), 7308–7317. <https://doi.org/10.1021/acsapm.3c01245>
- Weaver, F. W.,** & Owen, N. L. (1995). Isocyanate-wood adhesive bond. *Applied spectroscopy*, 49(2), 171-176.
- Wu, S.,** & Xu, W. (2022). Sound insulation performance of furfuryl alcohol-modified poplar veneer used in functional plywood. *Materials*, 15(18), 6187, 1-15. <https://doi.org/10.3390/ma15186187>
- Wu, Z.,** Zhang, B., Zhou, X., Li, L., Yu, L., Liao, J., & Du, G. (2019). Influence of single/collective use of curing agents on the curing behavior and bond strength of

- soy protein-melamine-urea-formaldehyde (SMUF) resin for plywood assembly. *Polymers*, 11(12), 1995, 1-14. <https://doi.org/10.3390/polym11121995>
- Xing, Z.**, Zhu, L., Wu, Y., Wu, D., Gao, C., Meng, L., & Tang, X. (2023). Effect of nano-TiO₂ particle size on the bonding performance and film-forming properties of starch-based wood adhesives. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, 123697, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123697>
- Xu, G.**, Tian, H., Xi, X., Song, J., Lei, H., & Du, G. (2022). Preparation and characterization of urea-formaldehyde adhesives modified with glyoxalated tannin. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(5), 1215-1223. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01819-1>
- Yadav, S. M.**, Lubis, M. A. R., & Park, B. D. (2022). Modification of nanoclay with different methods and its application in urea-formaldehyde bonded plywood panels. *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 734-743. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1934897>
- Yan, Y.**, Wang, J., Shen, Z., Bi, H., & Shentu, B. (2023). Flame resistance and bonding performance of plywood fabricated by guanidine phosphate-impregnated veneers. *Forests*, 14 (4), 741, 1-15. <https://doi.org/10.3390/f14040741>
- Yang, G.**, Wang, X., & Zhong, D. (2023). Properties of engineered wood flooring with cold-pressing and emulsion polymer isocyanate adhesive. *BioResources*, 18(3), 5574-5584. <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.5574-5584>
- Yang, H.**, Wang, H., Du, G., Ni, K., Wu, Y., Su, H., & Ran, X. (2023). Ureido hyperbranched polymer modified urea-Formaldehyde resin as high-performance particleboard adhesive. *Materials*, 16(11), 4021, 1-14. <https://doi.org/10.3390/ma16114021>
- Yang, R.**, Sun, Y., Wu, Y., Wang, B., Song, Y., Sheng, Z., & Nie, Y. (2023). Synthesis of spinnable melamine formaldehyde resin prepolymer using ionic liquid and performance regulation of melamine fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(20), e53846, 1-12. <https://doi.org/10.1002/app.53846>
- Yang, Y.**, Kang, X., Yang, Y., Ye, H., Jiang, J., Zheng, G., & Peng, W. (2023). Research progress in green preparation of advanced wood-based composites. *Advanced*

- Composites and Hybrid Materials*, 6(6), 202, 1-17.
<https://doi.org/10.1007/s42114-023-00770-w>
- Yu, X.**, Xu, D., Sun, Y., Geng, Y., Fan, J., Dai, X., & Li, Y. (2020). Preparation of wood-based panel composites with poplar veneer as the surface layer modified by in-situ polymerization of active monomers. *Forests*, 11(8), 893.
<https://doi.org/10.3390/f11080893>
- Yusuf, Y. A. U.**, Sulaiman, T. A., Mohammed, A., Garba, I., & Musa, M. M. (2026). Development of analytical models for predicting strength properties in cross-laminated timber (CLT) panels bonded with polyurethane (PUR) and epoxy resin (ER) adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 104335. 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2026.104335>
- Zanuttini, R.**, Negro, F., & Cremonini, C. (2021). Hardness and contact angle of thermally treated poplar plywood for organic construction. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 14 (3), 274-277. <https://doi.org/10.3832/ifor3662-014>
- Zelinka, S.L.**, & Glass, S.V. 2010. Water vapor sorption isotherms for southern pine treated with several waterborne preservatives. *Journal of Testing and Evaluation*, 38(4), 1-5. <https://doi.org/10.1520/jte102696>
- Zhang, W.**, Olsson, E. O. L., Enemark-Rasmussen, K., Glarborg, P., Dam-Johansen, K., Li, S., & Wu, H. (2025). An experimental study of the transformation of phosphorus additives during biomass pyrolysis. *Fuel*, 398, 135554, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135554>
- Zhao, P.**, Xu, J., Cheng, N., Hu, H., Zhang, X., Xu, X., & Han, W. (2025). Bridging the reality gap: A benchmark for physical reasoning in general world models with various physical phenomena beyond mechanics. *Expert Systems with Applications*, 270, 126548, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.126548>
- Zhou, Q. F.**, Liang, D. D., Cheng, A. K., Wang, X. J., & Tu, D. Y. (2023). Effects of pressing temperature and compression ratio on density distribution and hardness of surface densified poplar wood. *Wood Research*, 68(3), 465-476.
<https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/68.3.465476>

Zhu, L., Wang, Z., Zhou, Y., & Liu, Y. (2017). Adaptive neural network saturated control for MDF continuous hot pressing hydraulic system with uncertainties. *IEEE Access*, 6, 2266-2273.

Internetové zdroje

- (1) <https://encyklopedie.bioooo.cz/vyhledat-slozeni/kyselina-borita-boric-acid/> (23-08-2023)
- (2) <https://www.funchem.cz/www-funchem-cz/eshop/1-1-ANORGANICKE-LATKY/1-1-Kyseliny/5/283-Kyselina-borita-99-c-1000g-OMEZENI> (23-08-2023)
- (3) <https://www.ferpotravina.cz/seznam-ecek/E284> (23-08-2023)
- (4) https://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina_borit%C3%A1 (23-08-2023)
- (5) <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C10043353&Units=SI&Mask=80#IR-Spec> (23-08-2023)
- (6) https://cs.wikipedia.org/wiki/Tetraboritan_sodn%C3%BD (23-08-2023)
- (7) https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB2855556.htm (24-08-2023)
- (8) <http://cz.hongjinchemicals.com/flame-retardant/phosphorus-flame-retardants/ammonium-polyphosphate-cas-68333-79-9-flame.html> (24-08-2023)
- (9) <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyfosf%C3%A1t> (24-08-2023)
- (10) <http://cz.crownchampion.com/phosphate-raw-material/ammonium-polyphosphate-app/ammonium-polyphosphate-powder.html> (24-08-2023)
- (11) <https://www.drhoffmann.cz/hydrogenfosforecnan-diamonny-cisty-100g-id239.html> (24-08-2023)
- (12) <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.029.079> (24-08-2023)
- (13) <https://www.carlroth.com/medias/SDB-P736-CZ-CS.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyMzk0OTI8YX BwbGljYXRpb24vcGRmfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oMmUvaGY5Lzkw ODMwNjk3MjY3NTAucGRmfDFjMDAyYjhkNGNIZjMzZTg3MDQ3ZjQ4MmVm Y2ZiOGEzMDJiNTM2Y2E2OTA2OTFjZTQxYTk0ZWl1NTUxZDI0NmI> (24-08-2023)
- (14) <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7783280&Units=SI&Mask=80#IR-Spec> (24-08-2023)
- (15) https://cs.wikipedia.org/wiki/Dihydrogenfosfore%C4%8Dnan_amonn%C3%BD (24-08-2023)
- (16) <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7722761&Units=SI&Mask=80#IR-Spec> (24-08-2023)
- (17) <https://www.drhoffmann.cz/dihydrogenfosforecnan-amonny-cisty-100g-id444.html> (24-08-2023)
- (18) <https://www.carlroth.com/medias/SDB-5580-CZ-CS.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyMzkwNDN8Y XBwbGljYXRpb24vcGRmfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oOTMvaGllLzkw NDE2MzcyNDQ5NTgucGRmfGJhZmEzODE2MGZlZjZhOWY0MzhmMzZhNDJhZ GYyMjYlZjM3ZWNmNzQ5NjA3NjJIYzNmNmQ0YjYwYTJmOTMzNzM> (24-08-2023)

Seznam norem

Normy pro požární zkoušky a diagnostiku hoření

ČSN EN ISO 5659-2 (2017). Zkouška vývoje dýmu (Metoda jednokomorové zkoušky sloužící ke kvantifikaci optické hustoty kouře a dýmotvornosti vzorků při působení sálavého tepelného toku). Poskytovatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ISO 5660-1 (2015). Kónická kalorimetrie (Zkouška na kuželovém kalorimetru pro stanovení lokální energetické odezvy materiálu při uniformním sálavém toku HRR, THR, MLR). Poskytovatel: International Organization for Standardization.

ISO 5658-2 (2006). Stanovení laterálního šíření plamene po svislých prvcích (Zkouška prostorového šíření plamene po svislé ploše s gradientem tepelného toku pro stanovení kritického tepelného toku CHF). Poskytovatel: International Organization for Standardization.

Normy pro certifikaci a specifikaci adhezivních systémů

EN 14080 (2013). Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo a lepené masivní dřevo - Požadavky (Norma pro lepené masivní systémy splňovaná adhezivem KESTOPUR 1010). Poskytovatel: European Committee for Standardization.

EN 15425 (2023). Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Jednosložková polyuretanová lepidla (Normativní požadavek pro certifikaci použitého lepidla KESTOPUR 1010). Poskytovatel: European Committee for Standardization.

EN 15497 (2014). Konstrukční masivní dřevo s klínovým spojem - Požadavky na výrobu (Norma pro konstrukční cinkové spoje, kterou splňuje použité PUR adhezivum). Poskytovatel: European Committee for Standardization.

EN 16351 (2021). Dřevěné konstrukce - Křížem lepené dřevo (CLT) - Požadavky (Základní norma pro vícevrstvé masivní panely typu CLT splňovaná vybraným adhezivem). Poskytovatel: European Committee for Standardization.

Normy pro laboratorní testování vlastností lepidel

ČSN EN 542 (2003). Lepidla - Stanovení hustoty (Normativní metoda pro exaktní měření objemové hustoty tekutých adhezivních směsí při teplotě 23 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %). Poskytovatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 12092 (2002). Lepidla - Stanovení viskozity (Normativní standard použitý ke stanovení viskozity polyuretanového lepidla KESTOPUR 1010 i fenol-formaldehydové pryskyřice Lignofen G/3/P). Poskytovatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

Seznam obrázků

Obr. 1 UV-Vis difúzní reflektanční spektra vzorků upravených fosforečnany a amoniakálními sloučeninami. (Loureiro et al., 2011)	40
Obr. 2 Schéma rozdělení a umístění použitých lepidel a impregnačních látek v jednotlivých vrstvách překližky.	71
Obr. 3 Formátovací centrum, na kterém byly připravovány jednotlivé sestavy zkušebních těles.	72
Obr. 4 Impregnační koryto s nalitým impregnačním roztokem, ve kterém jsou ponořené a zatížené dýhy během řízeného procesu penetrační impregnace.....	73
Obr. 5 Impregnační komora VYVOS s napojením na externí kompresor pro tlakový impregnační proces.	73
Obr. 6 Testování parametrů připraveného adheziva, konkrétně teploty a viskozity, pomocí Fordova kelímku.	74
Obr. 7 Homogenizace lepicí směsi pomocí laboratorního míchadla s vrtulkovým nástavcem.	74
Obr. 8 Komora na testování vývoje kouře, držák vzorku v komoře, světelný kužel.	77
Obr. 9 Zařízení dle ISO 5658-2	79
Obr. 10 Vývoj plamene při testu	79
Obr. 11 Rozmístění termočlánku typu K po ploše testovaného vzorku.	80
Obr. 12 Umístění termočlánku typu K v průřezu testovaného vzorku.	80
Obr. 13 Uchycení vzorku v držáku a jeho fixace se zabezpečením termočlánků.	81
Obr. 14 Termočlánky a sběrnice dat.	81
Obr. 15 Fixace termočlánků	81
Obr. 16 Upevnění v přístroji.....	81
Obr. 17 Kónická kalorimetrie dle ISO 5660-1	82
Obr. 18 Držák vzorků	82
Obr. 19 Schéma měřicího prostoru.....	82
Obr. 20 Jednotlivé části tělesa.	84
Obr. 21 Metoda vymanipulování zkušebních těles ze vzorků.....	84
Obr. 22 Testovací sestava skládající se z TIRA Test 2850 a systému ARAMIS.....	86
Obr. 23 Příprava vzorku s rovnoměrným rastrem.	86
Obr. 24 Reálný snímek během zkoušky.	88
Obr. 25 Vyhodnocení deformací pomocí DIC (ARAMIS).....	89

Obr. 26 Ukázka modelu v programu GeoGebra s oběma Weibullovými funkcemi a jejich součet.	91
Obr. 27 Vývoj teploty u vzorku A1	106
Obr. 28 Vývoj teploty u vzorku A3	107
Obr. 29 Vývoj teploty u vzorku A2	107
Obr. 30 Vývoj teploty u vzorku A4	107
Obr. 31 Vývoj teploty u vzorku A6	108
Obr. 32 Vývoj teploty u vzorku A5	108
Obr. 33 Vývoj teploty u vzorku A7	108
Obr. 34 Vývoj teploty u vzorku A8	109
Obr. 35 Vývoj teploty u vzorku A9	109
Obr. 36 Vývoj teploty u vzorku A10	109
Obr. 37 Míra tepelné degradace těles určených na reziduální pevnost	115
Obr. 38 Abstraktní model hoření ARHE s vyznačeným modrým polem překryvu a červeným polem, které znázorňuje rozdíl mezi modelem a dvěma funkcemi.	126
Obr.39 ARHE modelu1B.	132
Obr. 40 ARHE model 2B.	132
Obr. 42 ARHE model 4B.	132
Obr. 41 ARHE model 3B.	132
Obr. 39 ARHE model 1B.	132
Obr. 44 ARHE model 6B.	132
Obr. 43 ARHE model 5B.	132
Obr. 45 ARHE model 7B.	133
Obr. 46 ARHE model 8B.	133
Obr. 47 ARHE model 9B.	133
Obr. 48 ARHE model 10B.	133

Seznam tabulek

Tabulka 1 Souhrnná tabulka zpomalovačů hoření a jejich hlavní účinné mechanismy	50
Tabulka 2 Technické specifikace Kestopur 1010	65
Tabulka 3 Technické specifikace Fenol-formaldehydové pryskyřice	68
Tabulka 4 Souhrnné hodnoty ke specifické optické hustotě kouře	97
Tabulka 5 Překlad konstant vyhodnocených podle modelu.	128
Tabulka 6 Procentuální zhodnocení celkového ARHE pomocí procentuálního vyjádření vůči 10B-ref.	130

Seznam grafů

Graf 1 Vývoj specifické optické hustoty kouře D_s	95
Graf 2 Rychlost změny specifické optické hustoty dD_s/dt	97
Graf 3 Zrychlení specifické optické hustoty $d^2 D_s / dt^2$	98
Graf 4 Kalibrační diagram tepelného toku zářiče.	99
Graf 5 Laterální šíření po povrchu.	100
Graf 6 První fáze tepelného prostupu.....	102
Graf 7 Srovnání průběhu teplot čidla ve vzdálenosti 1 a hloubce 5 mm.	103
Graf 8 Srovnání průběhu teplot čidla ve vzdálenosti 2 a hloubce 5 mm.	104
Graf 9 Srovnání průběhu teplot čidla ve vzdálenosti 3 a hloubce 5 mm..	104
Graf 9 Srovnání průběhu teplot čidla ve vzdálenosti 3 a hloubce 5 mm.	104
Graf 10 Srovnání průběhu teplot čidla ve vzdálenosti 4 a hloubce 5 mm.	105
Graf 11 Tuhost v ose y.....	111
Graf 12 Zdánlivý modul pružnosti v ohybu.	112
Graf 13 Procentuální pokles síly.	114
Graf 14 Průběh ARHE (Average Rate of Heat Emission) u sledovaných vzorků.	117
Graf 15 Znázorněná účinnost retardéru v jednotlivých variantách k vývoji ARHE.	119
Graf 16 Akcelerace ARHE.	121
Graf 17 Úhrn uvolněného tepla (THR).	123
Graf 18 Fázový portrét ARHE v závislosti THR.	124

Přehled publikační činnosti

- Holeček, T.,** Sahula, L., Hájková, K., Zeidler, A., Gach, M. B., Tylek, P., & Marcinik, T. (2025). Changes in chemical and mechanical wood properties in Silver Fir, Norway Spruce and Scots Pine Trees as a result of high temperatures due to fire. *Fire*, 9(1), 6, 1-14. <https://doi.org/10.3390/fire9010006>
- Holeček, T.,** Sikora, A., Šedivka, P., Cvejn, D., Sládek, D., Bárta, J., & Lagaňa, R. (2023). Novel hybrid polymer adhesives for laminated materials based on hardwood. *Composite Structures*, 308, 116684, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116684>
- Holeček, T.,** Šedivka, P., Sahula, L., Berčák, R., Zeidler, A., & Hájková, K. (2025). Investigation of pressure vacuum impregnation using inorganic, organic, and natural fire retardants on beech wood (*Fagus sylvatica*) and its impact on fire resistance. *Fire*, 8(8), 318, 1-13. <https://doi.org/10.3390/fire8080318>
- Holeček, T.,** Gašparík, M., Lagaňa, R., Borůvka, V., & Oberhofnerová, E. (2017). Measuring the modulus of elasticity of thermally treated spruce wood using the ultrasound and resonance methods. *BioResources*, 12(1), 819-838. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.819-838>
- Hájková, K., **Holeček, T.,** Filipi, M., Bárta, J., Sikora, A., & Özkan, U. (2025). Production and properties of particleboard and paper from waste poppy straw. *Scientific Reports*, 15(1), 339 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82733-9>
- Sikora, A., Šedivka, P., **Holeček, T.,** Cvejn, D., Bárta, J., Sládek, D., & Lagaňa, R.. (2025). Bending properties of hardwood-based layered wood composites bonded with polyurethane adhesive modified by thermosets. *Construction and Building Materials*, 460, 139831. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139831>
- Brejcha, V., Böhm, M., **Holeček, T.,** Jerman, M., Kobetičová, K., Burianová, I., & Pavlík, Z. (2025). Comparison of bending properties of sandwich structures using conventional and 3D-printed core with flax fiber reinforcement. *Journal of Composites Science*, 9(4), 182, 1-24. <https://doi.org/10.3390/jcs9040182>
- Hájková, K., Bárta, J., **Holeček, T.,** Filipi, M., & Synek, J. (2026). Lavender Paper: A Sustainable Alternative for Pulp Production. *AppliedChem*, 6(1), 11, 1-12. <https://doi.org/10.3390/appliedchem6010011>

- Hájková, K., Šedivka, P., **Holeček, T.**, Berčák, R., & Sahula, L. (2025). The effect of chemical modification by synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of structural fir (*Abies alba* L.) wood. *Fire*, 8(3), 116, 1-16. <https://doi.org/10.3390/fire8030116>
- Lagaňa, R., Nôta, R., Tončíková, Z., **Holeček, T.**, Langová, N., & Ďurkovič, J. (2025). Biomimetic assessment of 3D-printed T-shape joints bio-inspired by the stem-branch junction in common ssh (*Fraxinus excelsior* L.) trees. *Biomimetics*, 11 (1), 15, 1-17. <https://doi.org/10.3390/biomimetics11010015>
- Šulitka, M., Kuneš, I., Baláš, M., Pešková, K., Šedivka, P., **Holeček, T.**, & Podrázský, V. (2025). Effect of various lengths of cold stratification period on the germination of wild service tree (*Sorbus torminalis*) seed samples harvested in the Czech Republic. *Journal of Forest Science*, 71 (4), 171-181. <https://doi.org/10.17221/61/2024-JFS>
- Zachara, T., Šedivka, P., Borůvka, V., Kubista, K., **Holeček, T.**, Lexa, M., & Sikora, A. (2026). Cold-pressed insulation boards from recycled cotton fibers using a water-borne PVAc–starch binder: processing, structure and properties. *Materials*, 19(6), 1097, 1-19. <https://doi.org/10.3390/ma19061097>