

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

Lesní inženýrství



**STANOVENÍ EMISE TĚKAVÝCH ORGANICKÝCH LÁTEK
Z MATERIÁLŮ PRO DŘEVOSTAVBY**

ANALYSIS OF VOCs EMISSION IN THE FIELD OF WOOD CONSTRUCTION MATERIALS

DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor práce: Ing. Tereza Adamová

Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jaromír Hradecký, Ph.D.

Praha 2023

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Tereza Adamová

Lesní inženýrství

Zpracování dřeva a technika v lesním hospodářství

Název práce

Stanovení emise těkavých organických látek z materiálů pro dřevostavby

Název anglicky

Analysis of VOCs Emission in the Field of Wood Construction Materials

Cíle práce

Stanovit emise VOCs ze dřeva, z konstrukčních i izolačních materiálů na bázi dřeva a z alternativních lignocelulózových materiálů.

Porovnat emise těkavých organických látek z materiálů používaných pro moderní dřevostavby.

Metodika

Metodika je navržena tak, aby vedla k naplnění cílů práce. Je definována následujícími kroky:

1. Literární přehled řešené problematiky
2. Volba konvenčních a alternativních materiálů použitelných pro aplikaci v dřevostavbách, volba vhodných chemických modifikací, definování aplikovatelných analytických metod a postupů pro zjištění emise těkavých organických látek (VOCs)
3. Testování vybraných vzorků dřeva, lignocelulózových materiálů a konvenčně používaných materiálů v dřevostavbách pro stanovení emise VOCs, za využití zejména techniky mikroextrakce na tuhou fázi ve spojení se separací pomocí plynové chromatografie a hmotnostně-spektrometrické detekce (SPME-GC-MS)
4. Vyhodnocení dat získaných v rámci testování materiálů, porovnání emise VOCs jednotlivých materiálů a porovnání s tabulkovými hodnotami tepelných charakteristik testovaných materiálů, zhodnocení využitelnosti testovaných materiálů pro využití ve dřevostavbách
5. Výsledky a diskuze
6. Shrnutí a závěr
7. Doporučení pro vědu a praxi

Doporučený rozsah práce

100 – 120

Klíčová slova

GC-MS, těkavé organické sloučeniny, SPME, dřevostavby, dřevo, lignocelulózové materiály

Doporučené zdroje informací

- BOUCHONNET, Stéphane. Introduction to GC-MS coupling. Boca Raton: CRC Press, 2013. 228 s. ISBN 978-1-4665-7251-5.
- HÜBSCHMANN, Hans-Joachim. Handbook of GC-MS – Fundamentals and Applications. 3. vyd. Weinheim: Wiley-VCH, 2015. 863 s. ISBN: 978-3-527-33474-2.
- ISO 16000-6. Indoor air – Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA® sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS or MS-FID. Geneva: ISO copyright office, 2011. 29 s.
- KATUŠČÁK, Svetozár. VOC. Emisia prchavých organických látok z dreva a celulókových bio materiálův. 2. vyd. Bratislava: STU, 2006. ISBN 80-227-2459-9. 103 stran.
- MØLHAVE, Lars. Volatile Organic Compounds, Indoor Air Quality and Health. Indoor Air. 1991, vol. 1, issue 4, s. 357-376
- ŠTULÍK, Karel et al. Analytické separační metody. 1. vyd. Praha: Karolinum, 2005. ISBN 80-246-0852-9. 266 s.
- WILKE, Olaf et al. Bestimmung der VOC-Emissionen aus Grobspanplatten (OSB Platten) und ihre Bewertung nach dem AgBB-Schema. Berlin: Umweltbundesamt, 2013. 10 s.
-

Předběžný termín

2022/23 LS – FLD – Obhajoba DisP

Vedoucí práce

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Jaromír Hradecký, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 30. 11. 2022

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 8. 12. 2022

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Předseda oborové rady

Elektronicky schváleno dne 9. 12. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 08. 01. 2023

Anotace

Realizovaná studie řeší kvalitu vnitřního prostředí v budovách s ohledem na emise těkavých látek ze stavebních materiálů na bázi dřeva a dalších materiálů. Prostřednictvím monitoringu emise těkavých látek (VOCs) je možné vyhodnotit potenciální zdravotní rizika materiálů pro uživatele dřevostaveb. Práce je členěna do 4 okruhů experimentálního stanovení s ohledem na oblast použití materiálů – konstrukční, izolační, materiály univerzální a dřevo jako surovina pro výrobu vnitřního vybavení. Vybrané materiály byly s cílem snížit emisi VOCs dále chemicky modifikovány kyselinou citronovou, vinnou a hydrogenuhličitanem sodným. Pro vyhodnocení emise VOCs z OSB, konopného pazdeří (*Cannabis Sativa*), materiálů s izolačním potenciálem a vybraných vzorků dřeva/termicky modifikovaného dřeva byly aplikovány pokročilé instrumentálně analytické techniky. Pro stanovení látek byla použita metoda sorpce na sorbent Tenax TA[®] umístěný v trubičkách a sorpce na SPME vlákno. Pomocí plynové chromatografie s hmotnostně spektrometrickou detekcí (GC-MS) byly získány profily těkavých látek, jež byly dále identifikovány na základě podobnosti s knihovnou hmotnostních spekter. Data byla kvalitativně vyhodnocena pomocí metod multivariační analýzy a znalosti sloučenin, na které se zaměřuje současné vydání normy ISO 16000-6 vztahující se ke stavebním materiálům a jejich emisím do vnitřního prostředí.

Klíčová slova: plynová chromatografie-hmotnostní spektrometrie (GC-MS), těkavé organické sloučeniny (VOCs), headspace solid-phase microextraction (SPME), dřevostavby, dřevo, lignocelulózy materiály

Annotation

The presented study assesses the quality of the indoor environment in buildings with a special regard to volatile organic compounds from wood-based and other materials. While monitoring the VOCs' emissions potential health risks linked to materials for wooden buildings' production were targeted. The thesis is divided into 4 fields of experimental determination based on the purpose of materials' application – structural, insulating, all-purpose application and wood as a raw material for production of interior equipment. In order to reduce VOCs' emissions, selected materials were chemically modified using citric acid, tartaric acid, and sodium bicarbonate. Advanced instrumental analytical techniques were applied to evaluate the emission of VOCs from OSBs, hemp shive (*Cannabis Sativa*), materials with insulating potential and selected wood/thermally modified wood samples. The sorption techniques using Tenax TA[®] tubes and SPME fiber were used for the determination of compounds. Gas chromatography with mass spectrometric detection (GC-MS) was used to obtain volatiles' profiles. Consequently, these were identified based on similarity with library of mass spectra. The data interpretation was based on literature research, especially the current edition of the ISO 16000-6 standard focused on building materials and their emissions in the indoor environment. Multivariate analysis was employed to evaluate the data qualitatively.

Keywords: gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), volatile organic compounds (VOCs), headspace solid-phase microextraction (HS-SPME), wooden buildings, wood, lignocellulosic raw materials

Annotation

Die durchgeführte Studie befasst sich mit der Qualität des Innenraumklimas in Gebäuden im Hinblick auf Emissionen flüchtiger Stoffe aus Holzbaustoffen. Durch die Überwachung der Emissionen flüchtiger Stoffe (VOC), wird nach potenziellen Gesundheitsrisiken von Materialien für Holzkonstruktionen gesucht. Die Arbeit gliedert sich in 4 Bereiche der experimentellen Bestimmung im Hinblick auf den Bereich der Materialverwendung, Konstruktions-, Dämm-, Universalmaterialien und Holz als Rohstoff für die Herstellung von Innenausstattungen. Ausgewählte Materialien wurden mit Zitronensäure, Weinsäure und Natriumbicarbonat weiter chemisch modifiziert, um die VOC-Emissionen zu reduzieren. Zur Bewertung der VOC-Emissionen aus OSB-Platten, *Cannabis Sativa*, Materialien mit Isolierpotenzial und ausgewählten thermisch modifizierten Holzproben, wurden fortschrittliche instrumentelle Analysetechniken eingesetzt. Zur Stoffbestimmung wurde die Methode der Sorption an einem in Röhrchen eingebrachten Tenax TA[®]-Sorbens und der Sorption an einer SPME-Faser angewendet. Gaschromatographie mit massenspektrometrischer Detektion (GC-MS) wurde verwendet, um flüchtige Profile zu erhalten, die basierend auf der Ähnlichkeit mit einer Massenspektralbibliothek weiter identifiziert wurden. Die qualitative Auswertung der Daten erfolgte mittels multivariater Analyseverfahren und Verbundwissen, das im Mittelpunkt der aktuellen Ausgabe der ISO 16000-6 zu Baustoffen und deren Emissionen an das Raumklima steht.

Schlüsselwörter: Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS), flüchtige organische Verbindungen (VOC), Headspace-Festphasenmikroextraktion (SPME), Holzbauten, Holz, lignozellulosehaltige Materialien

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Stanovení emise těkavých organických látek z materiálů pro dřevostavby“ vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele. Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 7. 1. 2023

Ing. Tereza Adamová

“The future is not some place we are going, but one we are creating. The paths are not to be found, but made. And the activity of making them changes both the maker and the destination.”

— John Schaar —

Děkuji doc. Ing. Romanu Fojtíkovi, Ph.D., za vedení mé disertační práce a hodnotné rady. Velký dík patří Ing. Jaromíru Hradeckému, Ph.D. za podporu při realizaci experimentů, odborné připomínky a týmovou spolupráci. Děkuji doc. Ing. Miloši Pánkovi, PhD. in memoriam za velkou míru lidství a chápavý přístup během celého mého studia; a ostatním kolegům z fakulty za hezké společné roky.

Poděkování patří excelentnímu výzkumu EVA 4.0 za finanční podporu aktivit, které jsou nedílnou součástí této disertační práce.

Děkuji mým nejbližším za trpělivost, pochopení a důvěru.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A NÁZVOSLOVÍ.....	11
SEZNAM TABULEK.....	13
SEZNAM OBRÁZKŮ	14
1 ÚVOD	16
2 HYPOTÉZY A CÍL PRÁCE	17
3 LITERÁRNÍ PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	18
3.1 Udržitelné stavebnictví.....	18
3.1.1 <i>Vize šetrného stavebnictví.....</i>	18
3.1.1.1 Alternativní materiály aplikovatelné v dřevostavbách.....	20
3.1.1.2 Konvenční – průmyslově vyráběné materiály aplikované v dřevostavbách	22
3.1.1.3 Termicky modifikované dřevo	24
3.1.2 <i>Tepelné vlastnosti materiálů pro dřevostavby</i>	25
3.1.3 <i>Problémy na cestě k šetrnému stavebnictví.....</i>	26
3.2 Těkavé organické sloučeniny (VOCs) – přehled.....	28
3.2.1 <i>Systém členění VOCs</i>	28
3.2.2 <i>Globální zdroje VOCs.....</i>	29
3.2.3 <i>VOCs ve vnitřním prostředí budov.....</i>	29
3.2.4 <i>Regulativy stavebního sektoru spojené s výskytem VOCs</i>	31
3.2.5 <i>VOCs a materiály aplikované v oblasti dřevostaveb.....</i>	32
3.2.5.1 VOCs ze dřeva.....	32
3.2.5.2 VOCs z nátěrových hmot	38
3.2.5.3 VOCs z lepidel	39
3.2.5.4 VOCs z materiálů na bázi dřeva	39
3.2.5.5 VOCs z alternativních rostlinných vláken	42
3.2.6 <i>VOCs jako potenciální zdravotní riziko</i>	43
3.2.7 <i>Metody snižování emise VOCs ze dřeva a MnBD</i>	44
3.3 Instrumentální metody stanovení VOCs	45
3.3.1 <i>GC-MS pro detekci VOCs z biomateriálů a MnBD</i>	46
3.3.2 <i>Extrakční techniky VOCs a nástřikové techniky.....</i>	49
3.3.2.1 <i>Extrakce z pevného vzorku kapalinami</i>	49
3.3.2.2 <i>Sorpční techniky spojené s termální desorpčí.....</i>	50
3.3.3 <i>Zpracování dat, PCA a PLS-DA analýza</i>	53
4 MATERIÁL A POUŽITÉ PŘÍSTROJE	54
4.1 Charakteristika materiálů, jejich modifikace a příprava zkušebních vzorků....	54
4.1.1 <i>Dřevo vybraných dřevin.....</i>	54
4.1.2 <i>OSB (Desky z orientovaných plochých třísek)</i>	57
4.1.3 <i>Konopné pazdeři</i>	58
4.1.4 <i>Řepková řezanka</i>	59
4.1.5 <i>Rákos totora.....</i>	59
4.1.6 <i>Dřevní štěpka</i>	59

4.1.7	<i>Komerčně získané vzorky</i>	60
4.1.7.1	Polystyren.....	60
4.1.7.2	Minerální vlna	60
4.1.7.3	Polyuretanová pěna	60
4.1.7.4	Měkká dřevovláknitá deska	60
4.1.7.5	Kaučuková izolace.....	60
4.2	Použité chemické látky	60
4.3	Laboratorní vybavení	61
4.3.1	<i>Vybavení pro přípravu a klimatizaci vzorků</i>	61
4.3.2	<i>Přístrojové vybavení</i>	62
4.3.2.1	Plynový chromatograf s kvadrupól hmotnostním spektrometrem Shimadzu	62
4.3.2.2	Plynový chromatograf s TOF hmotnostním spektrometrem LECO.....	62
5	METODIKA	63
5.1	Extrakce VOCs a jejich stanovení pomocí plynové chromatografie s hmotnostně spektrometrickou detekcí	63
5.1.1	<i>Stanovení VOCs emitovaných z OSB</i>	63
5.1.2	<i>Stanovení VOCs z konopného pazdeří a smrkových třísek</i>	66
5.1.3	<i>Stanovení VOCs z izolačních materiálů</i>	69
5.1.4	<i>Stanovení VOCs emitovaných ze dřeva</i>	71
5.1.4.1	Stanovení emise VOCs z bělového a jádrového dřeva dubu.....	71
5.1.4.2	Stanovení emise VOCs termálně modifikovaného dřeva	71
5.2	Zpracování dat	73
6	VÝSLEDKY A DISKUZE	74
6.1	VOCs z konstrukčních desek dřevostaveb	74
6.2	VOCs z konopného pazdeří	79
6.3	VOCs z izolačních komponent pro dřevostavby	86
6.4	VOCs ze dřeva pro aplikaci v interiéru staveb	89
6.4.1	<i>Stanovení těkavých látek z jádra a běli dubu</i>	90
6.4.2	<i>Stanovení těkavých látek z termicky upraveného dřeva</i>	92
7	ZÁVĚR	97
8	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI	99
	SPOLUPRÁCE A NÁVAZNOSTI	101
	SEZNAM PUBLIKOVANÝCH ČLÁNKŮ	102
	PUBLIKOVANÁ SKRIPTA	102
	REALIZOVANÉ STUDIE	102
	CERTIFIKOVANÁ METODIKA	103
	TECHNICKY REALIZOVANÉ VÝSLEDKY	103
	SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	104
	SEZNAM PŘÍLOH	128

Seznam použitých zkratk a názvosloví

AS	<i>autosampler</i>
CAR	<i>carboxen</i>
CLT	<i>křížem lepený panel (Cross Laminated Timber)</i>
CO₂	<i>oxid uhličitý</i>
CPR	<i>Nariadení o stavebních výrobcích (Construction Products Regulation)</i>
CW	<i>carbowax</i>
DTD	<i>dřevotřísková deska</i>
DVB	<i>divinylbenzen</i>
FID	<i>plamenoionizační detektor (Flame Ionization Detector)</i>
FLEC	<i>laboratorní a terénní emisní cela (Field and Laboratory Emission cell)</i>
GC	<i>plynová chromatografie (Gass Chromatography)</i>
HS	<i>prostor nad vzorkem (Head-space)</i>
IAQ	<i>vnitřní kvalita ovzduší (Indoor Air Quality)</i>
LCI	<i>mezní hodnoty koncentrace (Lowest Concentration of Interest)</i>
LOD	<i>hraniční hodnoty detekce (Limit of Detection)</i>
m	<i>hmotnost.....[kg]</i>
MDF	<i>dřevovláknitá deska se střední hustotou (Medium Density Fiberboard)</i>
MDI	<i>methylen difenyl diisokyanát</i>
MF	<i>melamin-formaldehyd</i>
MnBD	<i>materiály na bázi dřeva</i>
mod.	<i>modifikace/modifikovaný</i>
MS	<i>hmotnostní spektrometrie (Mass Spectrometry)</i>
NC	<i>nitrocelulóza</i>
OSB	<i>deska z orientovaných plochých třísek (Oriented Strand Board)</i>
OPLS-DA	<i>ortogonální diskriminační analýza částečných nejmenších čtverců (Orthogonal Partial Least-Squares Discriminant Analysis)</i>
PA	<i>polyakrylát</i>
PC	<i>hlavní komponenta (Principal Component)</i>
PCA	<i>analýza hlavních komponent (Principal Component Analysis)</i>
PDMS	<i>polydimethylsiloxan</i>
PF	<i>fenol-formaldehyd (Phenol-Formaldehyde)</i>
PLE	<i>extrakce tlakovou kapalinou (Pressurized Liquid Extraction)</i>
PLS-DA	<i>diskriminační analýza nejmenších čtverců (Partial Least-Squares Discriminant Analysis)</i>
PUR	<i>polyuretan</i>
PVAc	<i>polyvinylacetát</i>
PVC	<i>polyvinylchlorid</i>
RT	<i>retenční čas</i>
SBS	<i>syndrom nezdravých (nemocných) budov (Sick Building Syndrome)</i>

S/N	<i>poměr mezi signálem a šumem (Signal-to-noise Ratio)</i>
SPME	<i>mikroextrakce analytu na pevnou fázi (Solid Phase Microextraction)</i>
SVOC	<i>polotěkavé organické sloučeniny (Semi-volatile Organic Compound)</i>
SW	<i>software</i>
T	<i>teplota [°C]</i>
TD	<i>termální desorpce (Thermal Desorption)</i>
TVOC	<i>celková koncentrace těkavých organických látek ve vzduchu (Total Volatile Organic Compounds)</i>
UF	<i>močovino-formaldehyd (Urine-formaldehyde)</i>
VOCs	<i>těkavé organické sloučeniny (Volatile Organic Compounds)</i>
VŘ	<i>vodouředitelný</i>
VVOC	<i>velmi těkavé organické sloučeniny (Very-volatile Organic Compound)</i>
VVÚD	<i>Výzkumný a vývojový ústav dřevařský</i>

<i>anglický termín</i>	<i>český ekvivalent</i>
<i>3-Carene</i>	<i>3-karen</i>
<i>3-Octanone</i>	<i>3-oktanon</i>
<i>α /alpha-Pinene</i>	<i>α /alfa-pinen</i>
<i>α /alpha-bergamotene</i>	<i>α /alfa-bergamoten</i>
<i>β /beta-Pinene</i>	<i>β /beta-pinen</i>
<i>β /beta-Myrcene</i>	<i>β /beta-myrcen</i>
<i>β /beta-Phellandrene</i>	<i>β /beta-felandren</i>
<i>Benzaldehyde</i>	<i>benzaldehyd</i>
<i>Camphene</i>	<i>kamfen</i>
<i>Decane</i>	<i>dekan</i>
<i>Dodecane</i>	<i>dodekan</i>
<i>Limonene</i>	<i>limonen</i>
<i>Octanal</i>	<i>oktanal</i>
<i>Toluene</i>	<i>toluen</i>
<i>Xylene</i>	<i>xylen</i>

Seznam tabulek

Tab. 1 Součinitel tepelné vodivosti pro vybrané materiály	26
Tab. 2 Porovnání surového a termicky modifikovaného dřeva různého stáří	34
Tab. 3 Množství emise organických kyselin a aldehydů ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) ze dřeva topolu, smrku a borovice 38	
Tab. 4 VOCs emitované ze dřeva.....	39
Tab. 5 Metody použité pro stanovení emise VOCs ze dřeva a MnBD.....	47
Tab. 6 Vybrané dřeviny; jejich využití v dřevěných konstrukcích a vnitřním prostředí budov	55
Tab. 7 Vliv termální modifikace na barevné změny vybraných vzorků dřeva.....	56
Tab. 8 Specifikace vzorků OSB pro analýzu emise VOCs	57
Tab. 9 Chemicky modifikované konopné pazdeří.....	58
Tab. 10 Základní parametry přístroje Shimadzu QP 2010 SE – Ultra	62
Tab. 11 Základní parametry přístroje LECO Pegasus 4D	62
Tab. 12 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z OSB – kvadrupól.....	65
Tab. 13 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z konopného pazdeří – kvadrupól	66
Tab. 14 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z konopného pazdeří – TOF.....	67
Tab. 15 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z izolačních materiálů – TOF.....	70
Tab. 16 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z jádra/běli dubu – TOF	71
Tab. 17 Parametry analýzy pro stanovení VOCs ze dřeva – TOF.....	72
Tab. 18 Porovnání sledovaných emisí VOCs naměřených 1. den experimentu (v %)	81
Tab. 19 Vývoj sledovaných emisí VOCs (v %) od 1. dne zahájení experimentu	82
Tab. 20 Emise benzaldehydu u vybraných izolačních materiálů a součinitel tepelné vodivosti	88

Seznam obrázků

Obr. 1 Ukázka použití konopného zdiva a izolačních konopných panelů v interiéru v kombinaci s masivními konstrukčními sloupy, dřevěným schodištěm a dřevěným nábytkem.....	21
Obr. 2 Příčný řez skupinou aerenchymatických stonků <i>Schoenoplectus californicus</i> subsp. <i>Tatora</i>	22
Obr. 3 Tělkavé organické látky (VOCs) ze dřeva a MnBD; jejich zdroje a vliv.....	30
Obr. 4 SPME vlákna pro mikroextrakci na pevnou fázi	52
Obr. 5 Vzorky dřeva v termické komoře před a po termické modifikaci.....	55
Obr. 6 Povrch vzorků OSB před uložením do exsikátorů.....	57
Obr. 7 Vzorky v uzavřených vialkách určené k analýze pomocí HS-SPME/GC-MS – změna barvy	59
Obr. 8 Vialka o objemu 20 ml pro uložení analytického vzorku před testováním pomocí HS-SPME	61
Obr. 9 Skleněná zkušební komora – exsikátor Novus DURAN 300	61
Obr. 10 Trubička se sorbentem Tenax TA [®] pro termální desorpci a odběr vzorku vzduchu pomocí mobilního odběrového čerpadla.....	64
Obr. 11 Vzorky v uzavřených vialkách určené k analýze pomocí HS-SPME/GC-MS.....	69
Obr. 12 Vzorky v uzavřených vialkách určené k analýze pomocí HS-SPME/GC-MS.....	69
Obr. 13 Kvalitativní porovnání emise VOCs z OSB 3. den.....	74
Obr. 14 Kvalitativní porovnání emise VOCs z OSB 7. den.....	75
Obr. 15 Kvalitativní porovnání emise VOCs z OSB 14. den.....	75
Obr. 16 Kvalitativní porovnání emise VOCs z OSB 28. den.....	76
Obr. 17 OSB modifikovaná 6% roztokem kyseliny citronové: koncentrace vybraných VOCs ve zkušební komoře 3. – 28. den od produkce.....	76
Obr. 18 OSB modifikovaná 6% roztokem kyseliny citronové: pokles koncentrace vybraných VOCs ve zkušební komoře v průběhu 28 dní	77
Obr. 19 OSB bez modifikace: průběh emise vybraných VOCs 3. – 28. den	77
Obr. 20 OSB s broušeným povrchem: průběh emise vybraných VOCs 3. – 28. den.....	78
Obr. 21 OSB – postřik povrchu kyselinou citronovou: průběh emise VOCs 3. – 28. den.....	78
Obr. 22 OSB – postřik povrchu kyselinou vinnou: průběh emise vybraných VOCs 3. – 28. den	78
Obr. 23 Vybrané emise VOC ze smrkového dřeva a neošetřeného konopí	80
Obr. 24 Chromatogram emise VOCs ze smrku a neošetřeného konopí se zaměřením na terpeny	80
Obr. 25 Změna emisí hexanalů (v %) u testovaných materiálů po skladování v exsikátorech	82
Obr. 26 PCA graf komponentního skóre pro konopí vč. opakovatelnosti	83
Obr. 27 PLS-DA graf komponentního skóre pro konopí	84
Obr. 28 PLS-DA graf vlivů představující důležité markery pro jednotlivé modifikace	84
Obr. 29 Vývoj emise vybraných VOCs ze smrku a konopí v čase	85
Obr. 30 Sloupcový graf ukazující přírodní, resp. přirozeně se vyskytující vybrané tělkavé látky ve vzorcích testovaných izolačních materiálů a materiálů pro jejich výrobu.....	87
Obr. 31 Sloupcový graf ukazující rezidua syntetického původu vyskytující se ve vzorcích testovaných izolačních materiálů a materiálů pro jejich výrobu.....	87
Obr. 32 Vliv teploty inkubace a sorpce (30, 50 a 80 °C) SPME vlákna na emisí VOCs	89

Obr. 33 PCA graf komponentního skóre: porovnání jádra a běli s ověřením opakovatelnosti	90
Obr. 34 OPLS-DA graf komponentního skóre: odlišení vzorků jádrového a bělového dřeva dubu	90
Obr. 35 PLS-DA graf vlivů prezentuje důležité markery pro jednotlivou část kmene – jádro a běl.....	91
Obr. 36 Zastoupení hexanalu, cis-whisky laktonu a 5-methylfurfuralu v jádře/běli dubu	91
Obr. 37 Přeložené chromatogramy dvoudimenzionálního stanovení emisí těkavých látek z neošetřených vzorků dřeva	92
Obr. 38 PCA graf komponentního skóre: zobrazení termicky ne/ošetřených vzorků dřeva	93
Obr. 39 PLS-DA graf komponentního skóre – dělení vzorků termovaného dřeva dle teploty ošetření	93
Obr. 40 PLS-DA graf vlivů; identifikovány nejvýznamnější sloučeniny pro separaci termo dřeva.....	94
Obr. 41 Zastoupení α -pinenu u termicky modifikovaného dřeva	94
Obr. 42 PCA graf komponentního skóre: neošetřené vzorky dřeva.....	95
Obr. 43 PCA graf vlivů; identifikovány nejvýznamnější sloučeniny pro separaci	96

1 Úvod

Téma přírodě blízkého stavebnictví a udržitelnosti se prolíná společností v posledních letech stále více. S ohledem na rostoucí nároky na kvalitu života lidí je pak prostor k užívání, ať už domácnost, kancelář nebo výrobní dílna, uzavřeným systémem, v němž se vyskytují materiály a zdroje látek, které těkají do vzduchu a mohou být následně snadno vdechnuty a dostat se do organismu. Tyto Volatile Organic Compounds neboli VOCs jsou ve vnitřním prostředí budov často považovány za příčinu syndromu nezdravých budov (SBS), jež se projevuje únavou, bolestmi hlavy, přecitlivělostí či dýchacími obtížemi (Tanaka-Kagawa, 2005). Efekt VOCs na lidské zdraví je pak předmětem diskuzí. Dle charakteru látek může být negativní, ale také prospěšný, jak uvádí Sharma *et al.* (2022).

Přestože materiály používané v dřevostavbách – komerčně vyráběné stavební materiály, dřevo a materiály na jeho bázi jsou přirozeně zdrojem uvedených látek (ISO 16000-6, 2011) – tato práce si dává za cíl stanovit je a hledat metody, které by mohly vést ke snížení jejich emise prostřednictvím několika vybraných modifikací – chemické, mechanické a termální. Současně jsou aplikovány efektivní postupy pro stanovení VOCs. Vhodnou technikou pro analýzu široké škály látek, resp. jejich emisí z materiálu do prostoru je GC-MS – plynová chromatografie spojená s hmotnostní spektrometrií.

V systému chromatografických metod zaujímá GC velmi významné místo a v průběhu let se stala jednou z nejdůležitějších a nejrozšířenějších metod analytické chemie (Hübschmann, 2015), což je dáno její jednoduchostí, citlivostí, vysokou separační účinností a rozsáhlými aplikačními možnostmi (Hradecký, 2017). Spojení plynové chromatografie a hmotnostní spektrometrie pak výrazně zvyšuje selektivitu a umožňuje provádět identifikaci komponent vzorku na základě získaného hmotnostního spektra ve složité matici (Štulík *et al.*, 2005). GC-MS je v různých podobách uplatnitelná pro analýzu emise těkavých organických sloučenin – VOCs ze dřeva a široké škály materiálů na bázi dřeva či z jiných organických surovin.

Na základě invence v použití materiálů vhodných pro aplikace ve dřevostavbách, upcyclací za využití stávající surovinové základny bez nadměrné exploatace neobnovitelných zdrojů a současně prostřednictvím důsledného monitoringu vlastností těchto surovin, vhodnou volbou konstrukčních systémů a výrobků zabudovaných do staveb vč. interiérového vybavení může být dlouhodobě determinována zdravotní nezávadnost vnitřního prostředí budov, a tudíž ovlivněn zdravotní stav osob, které se v nich vyskytují.

2 Hypotézy a cíl práce

Disertační práce je založena na následujících vědeckých hypotézách:

1. Pomocí instrumentálních technik je možné posoudit zdravotní nezávadnost vnitřního prostředí z hlediska emisí těkavých látek z použitých materiálů.
2. Alternativní materiály na bázi lignocelulózy mají menší emisi těkavých organických látek do prostředí oproti materiálům konvenčně užívaným ve stavebnictví.
3. Vybraná chemická a termická modifikace lignocelulóзовých materiálů snižuje emisi těkavých organických látek.

Z uvedených hypotéz vyplývá hlavní cíl práce:

cílem práce je stanovit emise VOCs ze dřeva, z vybraných konstrukčních i izolačních materiálů na bázi dřeva a z alternativních lignocelulóзовých materiálů; a porovnat emise těkavých organických látek z vybraných materiálů používaných pro moderní dřevostavby.

Dílčím cílem práce je modifikovat vybrané materiály za účelem snížení emise těkavých látek a tyto emise analyzovat.

3 Literární přehled řešené problematiky

3.1 Udržitelné stavebnictví

Vzhledem k tomu, že se udržitelnost v posledních desetiletích stala akcentovaným pojmem, je stěžejní, aby stavební průmysl, který je přímo či nepřímo odpovědný za významnou část každoročního zhoršování životního prostředí, přijal odpovědnost za přínos udržitelnému rozvoji, a to propagací staveb a stavebních metod šetrnějších k životnímu prostředí za použití alternativních materiálů, prostřednictvím recyklace a upcyklace materiálů a využíváním zelených zdrojů (Addis a Talbot, 2001).

Dřevostavby se staly zajímavou alternativou, pokud jde o spotřebu energie a tepelný komfort (Edminster *et al.*, 1998). Masivní (rostlé) dřevo je v současnosti využíváno ve stavebnictví na konstrukci stěn, podlah, stropů a střech. U obvodových konstrukcí na bázi dřeva se v technické oblasti objevují novodobá a výhodná řešení pláště budovy z hlediska skladby a uspořádání vrstev (Pavelek, 2019). Systémy se výrazně odlišují konstrukcí i vzhledem, což přispívá k možnosti využití dalších alternativních stavebních materiálů.

Podle Českého statistického úřadu byl v roce 2021 podíl dřevostaveb na trhu rodinných domů v České republice 14,6 %.

Systematický výběr udržitelných stavebních materiálů může být pro stavitele nejrychlejší cesta, jak začít do výstavby integrovat principy udržitelného designu při zachování zdravého vnitřního prostředí (Sharma a Kumar Sharma, 2022).

3.1.1 Vize šetrného stavebnictví

Celková mechanická stabilita budovy je dána nejen odpovídajícím konstrukčním návrhem, ale také chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi materiálů, z kterých je budova postavena (Addis a Talbot, 2001). Ty jsou často vybírány na základě funkčních, technických a nákladových hledisek (Sharma a Kumar Sharma, 2022).

S rostoucím tlakem na celkové snížení energetické náročnosti budov je zvýšená poptávka po tepelně izolačních materiálech a výrobních technologiích, které by umožňovaly toto směřování naplnit. Zpravidla se jedná o materiály na bázi polystyrenu a polyuretanu, jež jsou produktem petrochemického průmyslu, a na bázi minerální vlny, která vzniká synteticky za vysoké teploty ze silikátů. Výroba těchto izolačních materiálů představuje značnou energetickou a ekologickou zátěž s devastujícími dopady (Markets and Markets, 2022; Pulselli *et al.*, 2007; Asdrubali *et al.*, 2015).

Projektování šetrných budov by proto mělo začít výběrem a použitím materiálů které mají podobné nebo lepší vlastnosti než standardní – konvenční stavební materiály, ale zároveň jsou šetrné k životnímu prostředí (Addis a Talbot, 2001). Takové biologické

alternativy jsou v současné době k dispozici v omezeném, leč dostupném množství. Jedná se o materiály jako dřevěné panely (Vay *et al.*, 2015), bambus (Huang *et al.*, 2016), sláma (D'Alessandro *et al.*, 2017), rákos (Asdrubali *et al.*, 2015) a jiné průmyslové plodiny jako např. slunečnice (Binici *et al.*, 2014), kukuřičné klasy (Pinto *et al.*, 2011), konopí (Kymäläinen a Sjöberg, 2008) a bavlněné stonky (Zhou *et al.*, 2010) nebo méně běžná vlákna jako Ichu (Charca *et al.*, 2015), které dosud sloužily jako tepelná izolace stavebních konstrukcí. Tyto udržitelné izolační materiály jsou přístupné v několika formách – balíky, kompozitní desky (Chikhi *et al.*, 2013) a sendvičové panely (Alavez-Ramirez *et al.*, 2012); některé z nich jsou bez pojidel (Panyakaew a Fotios, 2011), některé jsou slepené udržitelnými omítkami nebo polymerními lepidly (Wei *et al.*, 2015) a některé z nich mohou být použity jako nosné konstrukce.

Mnohé z těchto materiálů byly používány po staletí, přesto byly postupně s ohledem na jejich nižší trvanlivost, nižší odolnost proti ohni a nižší odolnost proti vodě nahrazovány materiály syntetickými.

Aby však bylo možné uspokojit rostoucí poptávku po energeticky vhodných stavebních materiálech, je stěžejní hledat efektivní a ekologicky vhodné technologie a stále zdokonalovat tradiční metody za užití dostupných lokálních zdrojů. V tomto směru se nabízí využití tepelně-izolačních materiálů z odpadu z dřevozpracujícího průmyslu a ze zemědělského odpadu (Pavelek, 2018; Sharma a Kumar Sharma, 2022). Agroodpad získávaný z výsadby průmyslových plodin, zejména z olejnatých rostlin byl doposud využíván zejména jako surovina pro syntézu bionafty (Azadi *et al.*, 2017). Přestože jsou rostlinná vlákna chválena pro svou nízkou hustotu, specifické mechanické vlastnosti, biologickou rozložitelnost, nízkou spotřebu energie spotřebovanou pro jejich výrobu, nízkou uhlíkovou stopu, využívání lokálních surovin, obnovitelnost, recyklovatelnost a dostupnost, a v konečném důsledku možnost ekologické likvidace na konci životnosti, byl doposud zemědělský odpad využíván zejména jako krmivo pro zvířata, půdní hnojivo a spalován za účelem výroby tepelné energie (Wambua *et al.*, 2003). Historicky však byla vlákna z rostlinných zdrojů používána zejména v textilní výrobě a stavebnictví, příkladem jsou slámou vyztužené hliněné cihly (Oskouei *et al.*, 2017) a rákosové střechy (Brischke a Hanske, 2016). Uvedené materiály biologického původu tedy mají veškeré předpoklady pro užití v rámci udržitelného směřování stavebnictví, současně je však nutné počítat s jejich náchylností k proměnlivosti v důsledku variability jejich růstu v různých klimatických a půdních podmínkách. Rozhodovací proces výběru materiálu je tak v neposlední řadě ovlivněn nejen specifickými vlastnostmi materiálu, ale také požadavky na jeho bezpečnost a přístupem architekta, projektanta a investora (Pavelek, 2018; Sharma a Kumar Sharma, 2022).

3.1.1.1 Alternativní materiály aplikovatelné v dřevostavbách

Dřevní štěpka

Dřevní štěpka je potenciálně použitelným biologickým odpadem dřevozpracujícího průmyslu (Binici a Aksogan, 2016). Roční celosvětová produkce dřevní štěpky představuje 66,9 milionů tun (FAO). V tomto případě lze hovořit také o tzv. odpadním dřevě, tedy dezintegrovaném dřevním recyklátu, který představuje v rámci oběhového hospodářství důležitý surovinový zdroj s benefitem dlouhodobého ukládání CO₂. Čím déle se dřevo používá a recykluje, tím déle je schopné vázat skleníkové plyny. Dřevní recyklát se dnes využívá pro výrobu dřevotřískových desek (dále DTD). Jeho podíl jako suroviny představuje až 90 %, tyto desky však vykazují horší vlastnosti, a to zejména vyšší rozlupčivost. Použití roztřískovaného recyklátu by tak mohlo být vhodnou alternativou ke konvenčním izolacím (Gaff *et al.*, 2018; Havelková, 2017).

Konopí seté

Jednou ze stavebních alternativ je využití biomasy rychlerostoucích rostlin, např. konopí setého (*Cannabis sativa*). Tato rychle rostoucí jednoletá rostlina původem ze Střední Asie patří do čeledi *Cannabinaceae*, která je příbuzná kopřivám a podobná dřevu. V současné době je konopí pěstováno na mnoha místech severní polokoule. Konopí vyniká svým přírůstovým potenciálem, kdy lze velké množství plodiny sklízet při relativně nízkých nákladech (Çomak *et al.*, 2018; Mwaikambo a Ansell, 2002). Konopné pazdeří je dřevité jádro konopného stonku s vynikajícími tepelně izolačními vlastnostmi. Vyznačuje se vysokou pórovitostí, nízkou tepelnou vodivostí a vysokou tepelnou kapacitou, viz **Tab. 1**. Mikrostruktura konopného pazdeří se podobá tvrdým dřevům se třemi hlavními vrstvami v buněčné stěně: střední lamela, primární buněčná stěna a sekundární buněčná stěna (Jiang *et al.*, 2018).

Díky svým dobrým fyzikálním, chemickým a mechanickým vlastnostem se konopí využívá ve stavebnictví i při výrobě biokompozitů, lehkých a izolačních betonů a izolačních panelů (**Obr. 1**). Zajišťuje lepší pružnost a vyšší nosnost než masivní dřevo, a tak může snadno nahradit tradiční skladbu stěny skeletové stavby s lehkým sendvičovým obvodovým pláštěm sádkarton-OSB-parobrzdá/parozábrana-izolace (Kolb, 2008; Çomak *et al.* 2018; Donatelli *et al.*, 2017).

Materiály na bázi konopí se používají buď surové (pazdeří, vlákno nebo tepelná izolace), nebo zpracované (spolu s lepidly jako polymerové matrice nebo jako látky zlepšující soudržnost). Nové stavební kompozity na bázi konopného pazdeří a sol oxidu křemičitého byly zkoumány pomocí plynové chromatografie a hmotnostní spektrometrie (GC-MS). Celková výtěžnost extraktiv dosáhla 6,23 % (suché hm. %) následována nízkou hustotou a zvýšenou odolností kompozitu vůči vodě (Hussain *et al.*, 2019). Konopné pazdeří smíchané s hašeným vápnem (hydroxid vápenatý) poskytuje stavební materiál, který je pevný, odolný, zvukotěsný, odolný vůči plísním a dobře použitelný jako biologická izolace. Aby se z konopného pazdeří mohl stát stavební a konstrukční

materiál, vyžaduje minimální zpracování. Jeho využití představuje ekologicky šetrnější cestu ve srovnání s tradičními stavebními materiály na bázi železa nebo skla, což vede ke zlepšení ekologické rovnováhy budov během celého jejich životního cyklu. Materiály z konopí a hašeného vápna navíc přispívají ke snížení emisí oxidu uhličitého – CO₂. Ten se vstřebává při vysazování a pěstování konopí stejně tak během procesu, kdy se hašené vápno při kontaktu s vodou opět sráží v uhličitán vápenatý (Comak *et al.* 2018; Brzyski a Łagód, 2018; Brzyski *et al.*, 2017).



Obr. 1 Ukázka použití konopného zdiva a izolačních konopných panelů v interiéru v kombinaci s masivními konstrukčním sloupy, dřevěným schodištěm a dřevěným nábytkem – proces výstavby a užívání (Practice Architecture, 2020)

Řepka olejka

Řepka olejka (*Brassica napus*) je nejvýznamnější olejnatou rostlinou v Evropě. Jedná se o jednoletou rostlinu, která dorůstá výšky až jednoho metru. Stonek se skládá z vláken dlouhých 0,7-2 mm o hustotě 1550 kg.m⁻³, obsahujících 40-50 % celulózy, 25-30 % hemicelulózy a 17-21 % ligninu jako hlavních chemických složek (Tofanica, 2011).

Roční celosvětová sklizeň řepky je cca 12,6 milionů tun, což představuje asi 14 % celkové produkce osiva obilí. Celková plocha pěstování řepky v Evropské unii činí 6,6 mil. ha, což je přibližně polovina celkové plochy produkce olejnatých semen v EU (Carré a Pouzet, 2014; USDA).

Krom toho, že se řepka olejka používá jako zdroj pro výrobu biopaliv, je tato jednoletá rostlina považovaná za zemědělský odpad a používaná buď jako krmivo pro zvířata, půdní hnojivo nebo jako biomasa pro výrobu tepelné energie. Alternativně však lze jakožto celulózový materiál z místních a biologických zdrojů použít jako tepelná

izolace při udržitelné výstavbě, podobně jako výše uvedené dřevní štěpky/třísky, které mohou vznikat jako bioodpad z dřevařského průmyslu (Pavelek a Adamová, 2019).

Rákos totora

Dle Hidalgo-Cordera a Garcíi-Navarra (2017) patří totora (*Schoenoplectus californicus* subsp. *Tatora*) k tradičním materiálům původních obyvatel Latinské Ameriky, kde roste v přímořských oblastech až po nadmořské výšky 4500 m n.m. Rostlina může dosáhnout výšky až 6 m, dobře odolává výkyvům v přísunu vody, není náročná na pěstební podmínky a současně má velký význam v sekvestraci CO₂. Roční produkce rákosu představuje 56 t.ha⁻¹ sušiny, což je cca 5 krát více než průměrná produkce biomasy jehličnatých dřevin. Historické využití totory pro stavbu obydlí, střech a lodí poukazuje na jeho potenciál pro aplikaci ve stavebním sektoru. Možnosti použití totory, ať už v surovém vysušeném stavu nebo jako aglomerovaného plošného materiálu při využití různých rostlinných částí analyzoval Hidalgo-Cordero *et al.* (2020), který zdůrazňuje jeho potenciál při využití jako tepelné izolace, a to s ohledem na aerenchymatickou strukturu samotného stonku (**Obr. 2**), který obsahuje velké dutiny vyplněné vzduchem.



Obr. 2 Příčný řez skupinou aerenchymatických stonků *Schoenoplectus californicus* subsp. *Tatora*

3.1.1.2 Konvenční – průmyslově vyráběné materiály aplikované v dřevostavbách

OSB

Desky z orientovaných plochých třísek (Oriented Strand Board, dále OSB), představují zpravidla třívrstvý materiál vyráběný z dlouhých, štíhlých a tenkých třísek. Třísky ve vnějších vrstvách jsou orientovány rovnoběžně s délkou nebo šířkou desky, třísky ve středové vrstvě jsou orientovány kolmo na třísky vnějších vrstev (Hugues *et al.*, 2004). V Evropě se nejčastěji zpracovávají jehličnany, převážně borovice a smrk (Wilke *et al.*, 2013). Za jednu z největších předností OSB je považována skutečnost, že surovina nízké kvality může být použita pro výrobu vysoce kvalitního produktu. Jednotlivé třísky pro výrobu OSB jsou získávány ve směru rovnoběžném s vlákny dřeva (nejčastěji v prstencových nebo diskových roztřískovačích). Velikost typické třísky pro výrobu OSB má rozměry 0,3-0,7 × 15-25 × 75-150 mm. Nejdelší třísky se používají pro povrchové vrstvy OSB, menší na středové vrstvy. Na lepení třísek se většinou používá kombinace melamin-formaldehydových (MF) lepidel na třísky pro povrchové vrstvy a izokyanátových (MDI) lepidel na třísky pro středovou vrstvu. Lepidla používaná pro výrobu OSB uvolňují jen velmi málo (nebo v případě MDI lepidel žádné) emise formaldehydu (Berge, 2009).

Největší uplatnění OSB ve stavebnictví je jako konstrukční materiál na opláštění stěn, záklopy střech a podlah u dřevostaveb a na výrobu tzv. I-nosníků a sendvičových panelů (Hudec *et al.*, 2013).

Měkká dřevovláknitá deska

Měkké dřevovláknité desky jsou plošným materiálem, který se vyrábí z lignocelulózových vláken za použití tepla a/nebo tlaku. Výroba probíhá mokřím výrobním procesem s přidavkem lepidla a hydrofobizačních přísad (obvykle parafinu). Desky mají přírodní charakter a působí jako difúzně otevřený izolační materiál (umožňují prostup vlhkosti), což vedlo k opětovnému rozšíření jejich výroby v posledních desetiletích. Tyto desky jsou specifické hustotou v rozpětí 250-400 kg.m⁻³, dobrými zvukově a tepelně izolačními vlastnostmi, biologickou nezávadností a jednoduchostí zpracování.

Desky jsou vyráběny s rovnou hranou nebo úpravou hran na pero a drážku (Böhm *et al.*, 2012a). Nejčastěji se měkké dřevovláknité desky uplatňují jako výplňový nebo izolační materiál připevněný k nosné konstrukci; jsou aplikovány jako tepelná a zvuková izolace, při novém i dodatečném zateplení vnějších stěn a podkrovních prostorů, podhledů a stropů, při stavbě příček a dále jako podklad různých druhů podlah a izolace kročejového hluku (Pavelek, 2019).

Polystyren

Polystyren je jedním z nejčastěji vyráběných termoplastů. Patří mezi materiály vyráběné polymerizací z hlavní složky – styrenu.

Od roku 1959, kdy byl poprvé aplikován, měl polystyren, extrudovaný polystyren a polyuretan stěžejní úlohu v oblasti zateplování budov, a do roku 2015 byla většina domů zateplena právě polystyrenem. Od října 2017 je zakázáno vyhazovat odpadní polystyren ze stavebnictví do komunálního odpadu kvůli riziku výskytu jedovatého hexabromcyklododekanu (HBCD) (Kolář, 2017). V dřevostavbách je aktuálně polystyren nahrazován minerální vlnou, která v mnoha státech dominuje lokálnímu trhu (Sohn *et al.*, 2017). Tento trend je v dnešní době podpořen častější volbou difúzně otevřeného systému, tedy aby konstrukce umožňovala prostup vodní páry z interiéru do exteriéru. Do této skladby stěny nelze zpravidla polystyren s ohledem na jeho tepelné vlastnosti použít (Hudec, 2013), nicméně s ohledem na míru jeho aplikace je polystyren do této studie zařazen.

Minerální vlna

Jak již bylo uvedeno, minerální vlna patří k nejčastěji používaným tepelně-izolačním materiálům nejen díky výborným tepelným vlastnostem, ale také kvůli nízké hustotě (80 kg.m⁻³) a možnosti použití jako velkoplošného materiálu. Zpravidla je dodávána ve dvou variantách, a to jako kamenná vlna nebo skelná vata. Výrobní složkou skelné vaty je písek a odpadové (recyklované) sklo. Výrobci dnes běžně uvádějí procento využití střepů ve výši 80 %. Kamenná vlna se vyrábí převážně z vyvřelých hornin:

vulkanického diabasu, čediče a dolomitu. Smíchávají se s připraveným recyklátem z minerálních vláken spojeným cementovým pojivem.

Minerální vlna je paropropustná a nehořlavá, nicméně její syntetická výroba představuje značnou energetickou zátěž. Nejen proto jsou dnes často hledány přístupy, jak za použití např. horké roztavené strusky, jejíž zpracování také představuje environmentální problém, docílit současně čistší výroby minerální vlny (Sohn *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2022).

Pěnový polyuretan

Polyuretanová pěna (PUR) je pěnovým izolantem na organické bázi, jenž je využíván ve formě desek na střechy a podlahová topení. Alternativou může být aplikace nástřikem přímo na stěny, kde během několika sekund zvětší pěna svůj objem a vytvrdne působením vlhkosti při vzniku CO₂. Polyuretany nepropouštějí vodu, ale umí propouštět vodní páru z konstrukce (Janík, 2008).

Polyuretany jsou vyrobeny z polymerního methylen diisokyanátu (PMDI) a polyolu, který se získává z ropy (Asdrubali *et al.*, 2015). Po vytvrdnutí je PUR pěna zdravotně nezávadná.

Kaučuková izolace

Izolace ze syntetického kaučuku je izolační materiál s širokou variabilitou použití. Vyrábí se ve variantách izolačních trubek, plošné izolace ve formě nekonečných izolačních pásů a prefabrikovaných izolačních tvarovek.

Výborných izolačních a parotěsných vlastností kaučukové izolace je dosaženo díky technologii uzavřené struktury buněk. To umožňuje použití izolace s menší tloušťkou a tím dosahovat úspor oproti běžně využívaným izolačním materiálům (K-flex izolace, 2022).

3.1.1.3 Termicky modifikované dřevo

Termicky modifikované dřevo představuje materiál se širokými možnostmi využití, který má ve srovnání s neupraveným dřevem nejen tmavší barvu, ale především zlepšenou rozměrovou stálost a odolnost. Ve většině technologických procesů při výrobě termovaného dřeva dochází ke zbarvení dřeva do odstínů od žluté po tmavohnědou (Reinprecht a Vidholdová, 2008), viz **Tab. 7**.

Termicky upravené dřevo vzniká procesem termické modifikace (mod.), který je značně šetrný k životnímu prostředí a dochází při něm za přítomnosti působení vyšších teplot, páry a podtlaku k úmyslné úpravě stavby dřeva bez použití chemických látek a předchozí impregnace (Yasuda a Minato, 1994). Cílem termické modifikace dřeva je vytvoření materiálu s vyšší rozměrovou stabilitou, zvýšenou odolností vůči biotickým škůdcům, který si zachovává – případně zlepšuje – mechanické vlastnosti a estetický vzhled (Reinprecht, 2008; Reinprecht a Vidholdová, 2008).

V samotném procesu termické modifikace dřeva dochází i k částečnému odbourávání a rozkladu látek, které jsou jinak termicky odolné. Při teplotě okolo 100 °C dochází v chemické struktuře k méně významným změnám, kdy probíhají pouze dehydratační procesy. Při vystavení teplotám 150-170 °C dochází k většímu zásahu do polymerové struktury složek dřeva a nastávají významnější termolytické a termooxidační reakce. Odbourávání ligninu a hemicelulóz nastává při vyšších teplotách v rozmezí od 150 do 260 °C, tento proces doprovází vznik vody, kyselin, oxidu uhličitého, furfuralu a jiných látek. Tyto doprovodné látky se mohou zapojit do následných kondenzačních reakcí. (Gandelová *et al.*, 2002; Kačíková a Kačík, 2011; Reinprecht a Vidholdová, 2008; Chow a Mukai, 1972).

Pro proces termické modifikace se nevyužívají teploty nad 240 °C, protože při nich dochází k závažné degradaci dřeva (Reinprecht, 2008; Reinprecht a Vidholdová, 2008)

3.1.2 Tepelné vlastnosti materiálů pro dřevostavby

Tepelná vodivost je vlastnost materiálu, která definuje rychlost, kterou je tepelná energie transportována materiálem v důsledku teplotního gradientu. Prostup tepla obálkou budovy je přímou funkcí její tepelné vodivosti a tloušťky. Určuje množství tepelných ztrát obvodovým pláštěm budovy; je tedy důležitým ukazatelem energetické účinnosti budov. Zatímco hodnocení energetické náročnosti budovy zahrnuje faktory jako strategie větrání, prosvětlování, orientace atd., pro hodnocení vybraných materiálů v rámci této disertační práce je právě tepelná vodivost klíčovým parametrem (Saeed *et al.*, 2022). Většina energie produkovaná moderní západní společností – krom spotřeby energie v dopravě, se spotřebovává do systémů vytápění budov – téměř 1/2 a 1/3 příspěvku k emisím CO₂ (Asdrubali *et al.*, 2015).

ČSN 73 0540-1 (2005) charakterizuje tepelně-izolační materiál jako: „*Materiál výrazně omezující šíření tepla, vykazující charakteristickou hodnotu součinitele tepelné vodivosti max. 0,1 W.m⁻¹.K⁻¹ při referenčních teplotních a vlhkostních podmínkách a daném stáří*“, tento materiál musí splňovat následující parametry: nízká hustota, vysoká specifická kapacita a nízká tepelná vodivost. Nejčastěji používané izolační materiály pak mají tepelnou vodivost mezi 0,03 a 0,05 W.m⁻¹.K⁻¹ (Berardi a Naldi, 2017).

Asdrubali *et al.* (2017) např. uvádí, že dřevo a materiály na bázi dřeva (dále MnBD) mají nízkou tepelnou vodivost, která se pohybuje od 0,042 do 0,18 W.m⁻¹.K⁻¹, což umožňuje vytvářet obvodové stěnové konstrukce s vysokým tepelným odporem a nízkými tloušťkami. Tyto konstrukce umožňují ukládání a uvolňování tepla vedoucím ke značné úspoře energie. Dřevo má však anizotropní charakter, a proto se jeho vlastnosti liší také v závislosti na směru vláken. Významnými faktory, které ovlivňují tepelnou vodivost, jsou např. druh dřeva, objemová hmotnost, vlhkost a právě anizotropie (Gupta *et al.*, 2003).

Rostlé dřevo může být v dřevěných konstrukcích využíváno na křížem lepené panely (CLT). Objemová hmotnost panelů se pohybuje obvykle okolo 500 kg.m^{-3} s hodnotou tepelné vodivosti $0,13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Lehmann, 2013). Tuzemské a zahraniční normy pak rozlišují tepelnou vodivost pro tvrdé a měkké dřevo, a to v závislosti na orientaci vláken. Vzorke masivního dřeva testovala Vololonirina *et al.* (2014). Byly použity vysušené vzorky dřeva s různými hustotami s úzkými a širokými letokruhy. Vzhledem k tomu, že byly získány relativně nízké hodnoty tepelné vodivosti ($0,080 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ v radiálním směru při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$), lze považovat vzorky dřeva za tepelné izolátory. Prałat (2016) měřil tepelnou vodivost pro šest druhů dřeva v různých směrech s vlhkostí 6-8 % uvnitř vzorků. Vypočtené hodnoty byly v rozmezí $0,126 \pm 0,225 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Nejnížší hodnoty byly získány u borového dřeva, nejvyššího u habrového dřeva. Již několik let je evidován výrazný růst poptávky po obnovitelných (přírodních) izolačních materiálech (konopí, sláma, rákos a další). Nevýhodou může být poměrně vyšší cena oproti syntetickým izolacím, která je dána především zpracováním v menším množství a nutností dovozu. Výhodami těchto materiálů na přírodní bázi je však nízká zátěž životního prostředí (Márton, 2014). Přehled vybraných materiálů a jejich tepelných vlastností shrnuje **Tab.1**.

Tab. 1 Součinitel tepelné vodivosti pro vybrané materiály (Pavelek, 2019; K-flex izolace 2022; Steico, 2019)

Druh materiálu	Objemová hmotnost ρ (kg.m^{-3})	Součinitel tepelné vodivosti λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
pěnový polyuretan - PUR deska	30-40	0,024-0,028*
kaučuková izolace	130	0,033*
extrudovaný polystyren	30	0,029-0,038*
expandovaný polystyren	30-60	0,031-0,040*
kamenná vlna	30	0,030-0,042*
skelná vata	25	0,035-0,045*
měkká dřevovláknitá deska	110-180	0,037-0,043*
deska na bázi konopí	30-40	0,040*
rákos	140-180	0,045-0,056**
sláma – balíky	90	0,050-0,080*
kukuřičné klasy	300-330	0,097-0,098**
DTD	800	0,110**
OSB	600	0,100-0,130**
biodeska	490-580	0,130-0,150**
dřevo rostlé – měkké (jehličnaté)	400	0,180**
dřevo rostlé – tvrdé (listnaté)	600	0,220**

* Deklarovaná hodnota

** Návrhová hodnota

3.1.3 Problémy na cestě k šetrnému stavebnictví

Současný stavební sektor se potýká v rámci směřování k udržitelnosti s několika problémovými oblastmi.

Jednou z nich je stavební odpad, vznikající při výstavbě budov. Ten je nicméně možné v určité míře opětovně využít v duchu cirkulární ekonomiky tak, aby se zabránilo vstřebávání mnohých škodlivých látek do vody, půdy nebo ovzduší. Například dřevo je materiálem, který lze efektivně separovat v odpadovém hospodářství a zpětně využít. V rámci odborných textů pojednávajících o odpadové problematice se lze setkat s pojmem dřevní recyklát. Pod tímto termínem se rozumí dřevo z demolic, nábytek, dřevěné palety, okenní a dveřní rámy (tedy v podstatě stavební odpad), použité řezivo, kůra a další zbytky dřeva. Dřevo a produkty ze dřeva mohou být ke konci svého životního cyklu upcyklovány, tedy znovu použity, při čemž dochází k ukládání velkého množství uhlíku absorbovaného stromy z oxidu uhličitého na dlouhou dobu. Dřevo váže skleníkové plyny, a tak aktivně redukuje jejich výskyt v atmosféře tím déle, čím déle se používá (Gaff *et al.*, 2018).

Dalším palčivým problémem je výše zmíněná energetická náročnost budov s ohledem na jejich životní cyklus; počínaje výstavbou za užití fosilních zdrojů přes jejich udržitelnost během užívání (Venkatarama a Jagadish, 2003; Ramesh *et al.*, 2010). Z průzkumu Evropské komise (2014) vyplývá, že budovy spotřebovávají celosvětově 40 % z vyrobené energie. Stavební sektor využívá přibližně 40 % přírodních zdrojů těžených v průmyslových zemích, spotřebuje téměř 70 % elektřiny a 12 % pitné vody (Pulselli *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2005). Vzhledem k těmto zjištěním jsou a v blízké době budou nejen konstrukční, ale také izolační materiály často klíčovým prvkem v budovách (Pavelek, 2018).

Navazujícím tématem a fenoménem dneška je požadavek na zdravé vnitřní prostředí spojené s komfortem uživatelů budov. Většina realizovaných studií se v souvislosti s energetickou náročností, monitoringem emisí a zelenou výstavbou věnuje především emisím skleníkových plynů; zejména CO₂, a to s důrazem na celý životní cyklus budovy. Neméně významným faktorem ovlivňujícím kvalitu života obyvatel rezidenčních staveb a uživatelů např. kancelářských budov, jsou však emise těžkých organických sloučenin – Volatile Organic Compounds (dále jen VOCs) (Adamová *et al.*, 2018). Vedle dalších činitelů, jako jsou např. bakterie, plísně, roztoči, viry, domácí zvířata a rostliny, prach a kouř jsou VOCs jednou z příčin vedoucích ke snížení kvality vnitřního ovzduší a jsou spojovány s negativními dopady na lidské zdraví a blaho.

Jelikož je právě kvalita vnitřního prostředí do značné míry definována volbou stavebních materiálů, je všeobecně kladen důraz na snižování emisí VOCs, a to i v ekologických materiálech, jejichž používání nabývá v dnešní architektuře a v konstrukcích neustále na významu (Skov *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2010).

Problematika emisí VOCs z konvenčních i alternativních konstrukčních a izolačních materiálů užívaných v odvětví dřevostaveb je hlavním tématem této disertační práce. Členění VOCs, jejich zdrojů, potenciálním rizikům spojeným s jejich výskytem ve vnitřním prostředí budov a jejich analýze jsou věnovány následující kapitoly.

3.2 Těkavé organické sloučeniny (VOCs) – přehled

Zákon o ochraně ovzduší č. 86/2002 Sb., § 2 (2002) uvádí pro VOC následující definici: *VOC je organická sloučenina nebo směs organických sloučenin, s výjimkou methanu, která při teplotě 20 °C má tlak par 0,01 kPa nebo více, nebo má odpovídající těkavost za konkrétních podmínek jejího použití a může v průběhu své přítomnosti v ovzduší reagovat za spolupůsobení slunečního záření s oxidy dusíku za vzniku fotochemických oxidantů.*

VOCs představují rozsáhlou skupinu různých látek včetně těch přírodních, jakými jsou terpeny, alkoholy, ale také karbonylové sloučeniny jako ketony, aldehydy, ethery, aromatické uhlovodíky a kyseliny. Tyto látky jsou hlavními znečišťujícími látkami přítomnými ve vnitřním ovzduší budov (Demirel *et al.*, 2014; ISO 16000-6, 2011) a několik těkavých organických sloučenin je považováno přímo za toxické pro dýchání (IARC, 2006). Mnoho typů těkavých VOCs je fotochemicky citlivých; troposférický ozon a další nebezpečné produkty vznikají složitým komplexem reakcí přímo v ovzduší za přítomnosti VOCs, při expozici oxidům dusíku, slunečnímu záření a za působení tepla (Guenther *et al.*, 1995; You *et al.*, 2017; IARC, 2006).

Jak popisuje Světová zdravotnická organizace (1989), těkavými organickými sloučeninami jsou kromě polotěkavých organických sloučenin (dále jen SVOCs) a velmi těkavých organických sloučenin (dále jen VVOCs) jakékoli organické sloučeniny s bodem varu v rozmezí 50–100 °C až 240–260 °C, viz členění níže.

3.2.1 Systém členění VOCs

VOCs se dělí do základních 3 kategorií, a to na látky:

- a) **vysocetvroucí** – označují se termínem SVOC – Semi Volatile Organic Compounds s bodem varu větším než 240 °C. K těmto látkám patří např. polybifenyly, bifenyly a biocidy obsažené v ochranných prostředcích na dřevo (Čech, 2008).
- b) **nízkotvroucí** – jsou to organické látky s bodem varu od 50 °C (i níže) až do 100 °C. Nesou označení VVOC – Very Volatile Organic Compounds. Do této skupiny patří např. benzen, toluen, xylen a rozpouštědla na bázi chloru,
- c) **formaldehyd¹** – zástupce VVOC s významným negativním vlivem na lidské zdraví, proto je uveden v samostatné skupině,

¹ Formaldehyd je dle IARC (2016) řazen do 1. skupiny karcinogenů mezi 118 potenciálně nejnebezpečnějších rakovinotvorných látek. V oblasti dřevařského průmyslu je Fd důležitou chemickou surovinou pro výrobu termosetických lepidel/pryskyřic. Jeho reakcí s jinými monomery vznikají lepidla na bázi formaldehydu, která se používají především při výrobě materiálů na bázi dřeva. Fd je produktem mnoha přírodních procesů a v přírodě se také přirozeně vyskytuje. Je uvolňován během spalování biomasy, například při lesních požárech. Mezi zdroje formaldehydu antropogenního charakteru patří zejména spalování paliv, různé formy průmyslového využití (na úrovni produkce, užívání, uskladnění a přepravy materiálu) a uvolňování ze stavebních materiálů a spotřebních produktů (MnBD, textilní produkty, koberce, latexové barvy a pryskyřice) (Liteplo *et al.*, 2002; Carvalho *et al.*, 2012). Problematikou obsahu a emisí formaldehydu v oblasti stavebních materiálů se v minulosti zabývalo mnoho studií. Hodnoty uvedených parametrů byly v průběhu let regulovány a významně potlačeny na stopové množství. Pro analýzy Fd jsou dnes užívány vhodné a ověřené techniky; jeho detekce pomocí GC-MS není s ohledem na jeho těkavost proveditelná, a tudíž není jeho problematice v rámci disertační práce věnována rozsáhlejší pozornost.

Legislativa ochrany ovzduší rozlišuje VOCs dalším způsobem:

- a) **karcinogenní, mutagenní a toxické pro reprodukci**, kterým jsou přiřazeny tyto standardní věty o nebezpečnosti a musí být jimi označovány, s výjimkou benzínu
 - H340 – může vyvolat genetické poškození,
 - H350 – může vyvolat rakovinu,
 - H360 – může poškodit reprodukční schopnost nebo plod v těle matky,
- b) **halogenované** (obsahují některý z prvků – chlór, bróm, jód, fluor), jimž jsou rovněž přiděleny standardní věty o nebezpečnosti a musí být jimi označovány
 - H341 – podezření na genetické poškození,
 - H351 – podezření na vyvolání rakoviny,
- c) **ostatní VOCs** (Andreovský a Henelová, 2013)

3.2.2 Globální zdroje VOCs

Zdroje VOCs se dělí na dvě skupiny – přírodní a antropogenní. Přírodní zdroje jsou zastoupeny především volně rostoucí zelenou vegetací, která představuje přirozený zdroj emisí, jež ve skutečnosti nelze systematicky řídit a koordinovat. Oproti tomu antropogenního původce VOCs, tedy lidskou činnost, jako je průmyslová výroba, ropný průmysl a emise v důsledku užívání vozidel, možné regulovat je (Thurston, 2017; Guenther *et al.*, 1995; Li *et al.*, 2018). Některé VOCs, jako např. zmíněný formaldehyd, pak pocházejí jak z přírodního, tak z antropogenního původu. V některých regionálních oblastech se ukázalo, že emise VOCs vznikajících lidskou činností jsou mnohem vyšší než emise pocházející z přírodních zdrojů (Simon *et al.*, 2006). V tomto směru lze však v budoucnu předpokládat, že se díky programům cíleným na kontrolu a řízení snižování emisí zregulují emise VOCs z antropogenních zdrojů, a naopak význam biogenních VOCs pravděpodobně nabude na důležitosti (Tie *et al.*, 2006).

3.2.3 VOCs ve vnitřním prostředí budov

Lidé ve vyspělých zemích v 21. století tráví značnou část života (přibližně 90 %) uvnitř budov. S ohledem na fakt, že koncentrace VOCs naměřené v interiérech obvykle přesahují koncentrace těchto látek zjištěné v přírodě (Billionnet *et al.*, 2011), je nezbytné pamatovat právě na možné důsledky expozice VOCs ve vnitřním prostředí (Klepeis *et al.*, 2011; Cecchi, 2014).

Za určitých podmínek jsou obyvatelé špatně větraných budov náchylnější k tomu, aby trpěli tzv. syndromem nemocných budov (Sick Building Syndrome – dále jen SBS) (Tanaka-Kagawa, 2005), což je jev charakterizovaný různými příznaky, jako je bolest hlavy; podráždění očí, nosu nebo hrdla; suchým kašlem; alergickými reakcemi; suchou a svědivou kůží; přecitlivělostí; nespavostí; závratěmi a nevolností nebo potížemi

s koncentrací; a únavou (Joshi, 2008). Intenzivní zápach může mít i negativní psychologický vliv (Maskell *et al.*, 2015). Singleton *et al.* (2017) popisuje v souvislosti s expozicí VOCs náchylnost k chronickým onemocněním jater, Jain (2015) spojuje expozici člověka VOCs s regresí ledvin, v rámci studie Cakmaka *et al.* (2014) je pak poukázáno na škodlivý vliv vystavení VOCs na funkci mužských a ženských plic.

Zdroje VOCs ve vnitřním prostředí jsou různého původu. V interiérech jsou VOCs emitovány především ze stavebních materiálů, parket, dřevotřískových desek, OSB, překližky, nábytku obsahujícího lepidla na bázi formaldehydu (ČSN EN ISO 16000-9, 2007; Gminski *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2007; Madureira *et al.*, 2016) z povrchových úprav, včetně povrchových materiálů, jako je polyvinylchlorid (PVC)/vinyl nebo linoleum, z lepidel, barev a podlahových krytin (**Obr. 3**), a z výrobků denní spotřeby, jako jsou čisticí prostředky, hygienické výrobky pro osobní péči, vonné látky a osvěžovače vzduchu (Demirel *et al.*, 2014; Brown, 1999; Van der Wal *et al.*, 1997; Kirkeskov *et al.*, 2009; Wiglusz *et al.*, 2002).



Obr. 3 Tělavé organické látky (VOCs) ze dřeva a MnBD; jejich zdroje a vliv (Adamová *et al.*, 2020)

Výsledky, o nichž informoval Ewen *et al.* (2004), naznačují, že k SBS mohou přispívat i plísňe z hnilícího dřeva, poněvadž lze předpokládat že např. u staveb na bázi dřeva budou VOCs uvolňované z dřevokazných hub z různých částí budovy (např. zpoza obložení nebo zpoza podlahových lišt). Některé VOCs, které byly identifikovány právě z dřevokazných hub, mají obzvláště silný zápach a mnohé z nich mohou představovat možné zdravotní riziko.

S ohledem na to, že jsou VOCs považovány za plynné znečišťující látky, které mohou vstupovat anebo být infiltrovány do vnitřního prostředí také z venkovního prostředí, je v rozvinutých zemích akcentováno téma kvality vnitřního ovzduší (IAQ), jehož znečištění je vnímáno jako zásadní problém. Poněvadž se znečištění vnitřního ovzduší stalo hlavním určujícím faktorem zdraví dýchacích cest u lidí, byl pro stanovení

míry infiltrace těkavých organických sloučenin ve městech definován poměr mezi vnitřním a venkovním prostředím (Raysoni *et al.*, 2013; Hussein *et al.*, 2012).

Důsledný výběr stavebních materiálů, ale také převládající teplotní a vlhkostní podmínky, rozdíl tlaku vzduchu v konstrukci, konstrukční návrh a kvalita provedených stavebních prací, objem vzduchu obsaženého ve vnitřním prostoru, intenzita uvolňování VOCs rychlost odstraňování znečišťující látky ze vzduchu a rychlost výměny vzduchu s vnější atmosférou ovlivňují celkovou emisi VOCs ve vnitřním prostředí a hrají klíčovou roli pro následný zdravotní stav obyvatel a uživatelů budov (An *et al.*, 2011; WHO, 2009; Koivula *et al.*, 2005).

Vzhledem k tomu, že přítomnost těkavých organických sloučenin v ovzduší uvnitř budov vzbuzuje obavy kvůli uvedenému SBS, je nutné emise VOCs ze stavebních výrobků dále monitorovat a vyhodnocovat (Wolkoff, 1999).

3.2.4 Regulativy stavebního sektoru spojené s výskytem VOCs

Neharmonizované stavební výrobky, které nejsou regulovány příslušnými nařízeními Evropské unie, podléhají v rámci EU českému právnímu řádu. Na této národní úrovni jsou regulovány **Zákonem č. 22/1997 Sb.** o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů a jeho prováděcím **nařízením vlády č. 163/2002 Sb.**, kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky. Tyto dokumenty zahrnují i požadavky na emise nebezpečných látek do vnitřního prostředí staveb, nicméně limitní hodnoty nejsou na úrovni EU definovány a jednotlivé členské státy postupují podle svých národních požadavků na hygienické limity emisí. V rámci České republiky se jedná o **Vyhlášku č. 6/2003 Sb.**, kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb (ITC, 2021).

Evropská unie reguluje uvádění stavebních výrobků na trh aktualizovanými předpisy a nařízeními. Základní požadavek č. 3 „Hygiena, ochrana zdraví a životního prostředí“ je definován v nařízení Evropského Parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 (CPR – Construction Products Regulation), kterým se stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh téměř shodně jako v nařízení vlády č. 163/2002 Sb.

„Stavba musí být navržena a provedena takovým způsobem, aby neohrožovala hygienu ani zdraví jejích uživatelů a sousedů, neměla v celém průběhu životního cyklu nepřiměřeně významný vliv na kvalitu životního prostředí ani klimatu, a to během výstavby, používání i demolice, zejména následkem:

- *uvolňování toxických plynů,*
- *emisí nebezpečných látek, těkavých organických sloučenin, skleníkových plynů nebo nebezpečných částic do vnitřního nebo venkovního ovzduší,*
- *emisí nebezpečného záření,*
- *uvolňování nebezpečných látek do podzemní vody, mořské vody, povrchové vody nebo půdy,*

- *uvolňování nebezpečných látek do pitné vody nebo látek, které mají jinak negativní dopad na pitnou vodu,*
- *nesprávného vypouštění odpadních vod, emisí odpadních plynů nebo nesprávné likvidace pevného nebo kapalného odpadu,*
- *vlhkosti v částech stavby nebo na površích v rámci staveb.*“

3.2.5 VOCs a materiály aplikované v oblasti dřevostaveb

Stavební materiály zaujímají v dřevěných stavebních konstrukcích často velkou plochu. Jedná se o rostlé dřevo, lepené dřevo, plošné aglomerované materiály, izolační materiály apod. S ohledem na trend vedoucí ke zvyšování energetické účinnosti budov, kdy klesá průměrná výměna vzduchu v interiéru, dochází v budovách k celkově vyšší akumulaci VOCs. Volba alternativních materiálů a modifikace těch stávajících může představovat cestu k dosažení limitních požadavků daných regulativy (Ohlmeyer *et al.*, 2008).

3.2.5.1 VOCs ze dřeva

Dřevo je tradiční přírodní produkt s typickou příjemnou vůní složený z hlavních stavebních složek – z polysacharidů (celulózy, hemicelulózy a ligninu) –, které obsahují širokou škálu organických látek s nízkou molekulovou hmotností a extraktiva (Chen, 2014; Gérard *et al.*, 2019; Willför *et al.*, 2007). Jejich obsah se pohybuje od 0,5 do 20 % hmotnosti (Hill, 2006) a lze je snadno extrahovat ze dřeva neutrálními organickými rozpouštědly nebo vodou. Je dobře známo, že obsah extraktiv ve dřevě úzce souvisí s kvalitou dřeva (Gerlinger *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2018). Extraktiva často rozhodujícím způsobem ovlivňují mnoho charakteristických vlastností dřeva a následný účel jeho využití, opracování, sušení, impregnaci, povrchovou úpravu apod. Mezi některé z dotčených vlastností patří vůně, barva, světlostálost, hořlavost, hygroskopicitá, hustota, pevnostní vlastnosti, rozklad, odolnost proti hmyzu a propustnost (Hse a Kuo, 1988). Dle metody použité extrakce lze dřevní extraktiva rozdělit do skupin na lipofilní nebo hydrofilní (nebo polární) (Benouadah *et al.*, 2018; Hafizoglu a Holmbon, 1995). Důležitou součástí extraktiv ze dřeva jsou právě VOCs tvořené terpeny, terpenoidy, flavonoidy, alkoholy, aldehydy a ketony a také v menším množství vyššími alkeny a mastnými kyselinami (Bajer *et al.*, 2020). Jedná se o malé, ale stále dobře zjištělné množství VOCs, které může být ze dřeva uvolňováno (Roffael, 2006). Výskyt terpenů ve dřevě je primárně spojen s přítomností pryskyřice. V bělovém dřevě jehličnanů a u listnatých stromů proudí pryskyřice v buňkách parenchymu a v pryskyřičných kanálcích. V parenchymatických buňkách je tvořena terpeny, estery, tuky a vosky; v pryskyřičných kanálcích se skládá z pryskyřičných kyselin a těkavých terpenů. Jádrové dřevo jehličnanů obsahuje nejvíce terpenů v pryskyřičných kanálcích, kde jsou součástí těkavých olejů (Back, 2002). Například v případě borovice představují pryskyřičné kyseliny 67 % obsahu extraktů, zatímco ve smrku nepřesahují 24 % (Gandelová *et al.*, 2002). Dominantními VOCs v případě jehličnanů jsou mono-, di-, a sesquiterpeny,

zatímco u listnatých stromů převažují triterpeny a steroly. Nejvíce těkavou skupinou látek přítomnou v dřevě jsou monoterpeny, jejichž teplota varu se pohybuje v rozpětí 150-180 °C (Granström, 2005).

Výtažky z určitých druhů dřeva se používají v mnoha lékařských výrobcích a v parfémovém průmyslu. Jejich dopad na lidské zdraví může být negativní (Roffael, 2006), ale také pozitivní (Hiramatsu *et al.*, 2008). Této otázce se ve své studii věnují např. Peie a Yin (2016), kteří považují nový nábytek a dekorace ze dřeva za polutanty, které ovlivňují stav a kvalitu vnitřního prostředí. Oproti tomu studie od Xi *et al.* (2017) vyzdvihuje výhody vnitřního prostředí vybaveného dřevěným nábytkem pro jeho obyvatele, kteří trpí menším napětím a únavou, neboť VOCs emitované ze dřeva mohou pozitivně působit zejména na nervovou, dýchací a zrakovou soustavu.

Z hlediska analýzy VOC jsou nejvýznamnější skupinou ochranné a konzervační látky, zejména terpeny, pryskyřičné kyseliny, fenoly a taninové kyseliny, nicméně obsah a typ extraktivních látek, které se mohou uvolňovat jako VOCs (Bajer *et al.*, 2020), závisí převážně na druhu dřeviny (Willför *et al.*, 2007; Kadir a Hale, 2017; Nascimento *et al.*, 1995; Granström, 2005). Jak uvádí Stachowiak-Wencek a Pradzyński (2014) typ a množství VOCs přítomných (a případně uvolňovaných) ze dřeva závisí také na interakci s biotickými a abiotickými faktory, nemocemi, kvalitě půdy, výživě, zavlažování, na povětrnostních a klimatických podmínkách, zdravotním stavu rostliny, jakož i na fázi životního cyklu rostliny (např. hibernace) v okamžiku jejího zpracování. Dalšími významnými ovlivňujícími faktory jsou stáří stromů (Hafizoglu a Holmbom, 1995), genetika stromů (Nascimento *et al.*, 1995), místo výřezu dřeva z kmene (Zimmer a Melcher, 2017; Taylor *et al.*, 2011), lokalita růstu stromů (Tümen a Reunanen, 2010; Ioannidis *et al.*, 2019) a také dopad znečištění ovzduší a hnojení (Krutul *et al.*, 2014; Viiri *et al.*, 2001). Důležitý je také způsob technologického zpracování, např. sušení před zpracováním na finální výrobky (Englund a Nussbaum, 2000; Hse a Kuo; 1988). Stojí za povšimnutí, že termické zpracování urychluje uvolňování terpenů ze dřeva a zpracování při vyšších teplotách vede k poklesu množství terpenů u konečného výrobku, jak je uvedeno v **Tab. 2** (Kačík *et al.*, 2012).

Dopad stáří dřeva na obsah těkavých organických sloučenin a jejich emisi byl popsán ve studii Ewena (2004). Značný pokles emise některých významných sloučenin, stejně tak snížení počtu sloučenin v celkovém profilu VOCs byl pozorován při srovnání čerstvě pokáceného borového dřeva a rezonančních výřezů skladovaných po dobu přibližně 100 let. Nejširší spektrum extraktiv bylo nicméně pozorováno v případě tropických dřevin a jejich obsah byl rovněž vyšší ve srovnání se dřevem z mírného klimatického pásma (Gérard *et al.*, 2019; Kadir a Hale, 2017; Kilic a Niemz, 2012). Přesto jsou listnaté dřeviny mírného pásma – zejména různé druhy dubů (*Quercus sp.*) – a jehličnany intenzivněji průmyslově využívány než tropické listnaté dřeviny.

Jehličnany obsahují zejména pryskyřičné kyseliny, mastné kyseliny, terpeny a flavonoidy (Ioannidis *et al.*, 2019; Wajs *et al.*, 2006). Významné rozdíly jsou také

v jejich obsahu, v případě porovnání bělového a jádrového dřeva (Donaldson *et al.*, 2019), i když složení těkavých organických sloučenin bělí a jádra může být velmi podobné. Přestože u bělového a jádrového dřeva smrku byla pozorována značná podobnost a za pomoci metody sorpce na vlákno s pevnou fází – SPME (solid phase microextraction) bylo detekováno stejné množství těkavých organických sloučenin (101 sloučenin), *Z*- β -ocimen se vyskytoval pouze v bělovém dřevě, zatímco fenchol byl přítomen pouze v jádrovém dřevě (Wajs *et al.*, 2006).

Tab. 2 Porovnání surového a termicky modifikovaného dřeva různého stáří (Kačík *et al.*, 2012)

Components	A (1822)	B (1725)	C (1733)	D (1866)	E (1904)	F (2011)
α -Pinene ¹	0.5591 \pm 0.011	0.9940 \pm 0.020	5.5471 \pm 0.017	4.3292 \pm 0.026	34.8298 \pm 0.008	115.4721 \pm 1.095
Camphene ¹	-	-	-	0.3871 \pm 0.004	5.0133 \pm 0.042	12.3156 \pm 0.297
β -Pinene ¹	0.2759 \pm 0.015	0.2989 \pm 0.004	0.5565 \pm 0.012	0.1918 \pm 0.003	0.5448 \pm 0.025	20.9857 \pm 0.087
α -Phellandrene ¹	0.2989 \pm 0.023	0.3795 \pm 0.011	0.2715 \pm 0.014	-	1.4577 \pm 0.029	1.6450 \pm 0.041
Cymene ²	0.0000 \pm 0.000	0.6989 \pm 0.013	0.0000 \pm 0.000	-	2.0209 \pm 0.03	6.1589 \pm 0.047
Limonene ¹	1.0155 \pm 0.026	2.0284 \pm 0.015	1.1708 \pm 0.008	1.0872 \pm 0.013	1.5015 \pm 0.021	6.1684 \pm 0.120
Fenchol ²	-	-	-	-	0.5582 \pm 0.007	2.3811 \pm 0.172
Borneol ²	-	-	-	-	1.0892 \pm 0.017	3.3375 \pm 0.079
Thymol ²	-	0.2284 \pm 0.002	-	0.5200 \pm 0.014	1.2312 \pm 0.011	4.3070 \pm 0.127
Myrtenal ²	0.5330 \pm 0.013	0.8778 \pm 0.005	0.5144 \pm 0.013	1.2875 \pm 0.004	5.1788 \pm 0.02	6.1012 \pm 0.214
Verbenon ²	0.4081 \pm 0.010	0.4279 \pm 0.014	-	0.7923 \pm 0.019	5.2141 \pm 0.138	7.6208 \pm 0.134
Total	3.0906 \pm 0.071	5.9338 \pm 0.045	8.0603 \pm 0.027	8.5751 \pm 0.058	58.6394 \pm 0.214	186.4933 \pm 1.943

Components	A (1822)	B (1725)	C (1733)	D (1866)	E (1904)	F (2011)
α -Pinene ¹	0.2766 \pm 0.003	-	0.5243 \pm 0.023	2.4906 \pm 0.018	24.7044 \pm 0.139	43.5522 \pm 0.035
Camphene ¹	-	-	0.7200 \pm 0.024	-	4.1916 \pm 0.098	8.4603 \pm 0.026
β -Pinene ¹	0.0506 \pm 0.003	-	-	0.3041 \pm 0.011	0.4841 \pm 0.019	0.8930 \pm 0.012
α -Phellandrene ¹	-	-	-	0.3971 \pm 0.013	1.4752 \pm 0.017	0.9597 \pm 0.008
Cymene ²	-	-	-	0.5163 \pm 0.015	1.3008 \pm 0.058	3.8669 \pm 0.028
Limonene ¹	0.8267 \pm 0.012	0.6107 \pm 0.011	0.6847 \pm 0.011	2.3443 \pm 0.004	0.8725 \pm 0.05	0.7227 \pm 0.003
Fenchol ²	-	-	-	-	0.6654 \pm 0.014	0.5609 \pm 0.007
Borneol ²	-	-	-	-	1.2818 \pm 0.020	1.2658 \pm 0.024
Thymol ²	0.2809 \pm 0.015	0.2492 \pm 0.032	0.3240 \pm 0.028	0.2441 \pm 0.016	1.3113 \pm 0.080	3.3447 \pm 0.009
Myrtenal ²	0.6276 \pm 0.014	0.5774 \pm 0.005	0.8914 \pm 0.055	1.0085 \pm 0.017	4.8605 \pm 0.11	3.0267 \pm 0.056
Verbenon ²	-	0.2620 \pm 0.030	0.2965 \pm 0.020	0.3579 \pm 0.020	8.4572 \pm 0.166	3.1520 \pm 0.086
Total	2.0626 \pm 0.004	1.6993 \pm 0.069	3.4410 \pm 0.101	7.6630 \pm 0.081	49.6046 \pm 0.239	69.8048 \pm 0.076

Pozn.: Vzorky jedle bělokoré (*Abies alba*) jsou označeny A, B, C, D, E, F; uvedený rok představuje stáří dřeva (vzorky byly odebrány z trámů 5 historických budov a 1 novostavby). Stáří bylo určeno pomocí dendrochronologické analýzy. Část tabulky vyznačená **modře** zahrnuje vzorky bez termické modifikace. Množství těkavé látky je vyjádřeno v mg.kg⁻¹. Část tabulky vyznačená **zeleně** představuje vzorky po termické úpravě při zahřívání na 60 °C po dobu 10 hod. Množství těkavé látky je vyjádřeno v mg.kg⁻¹.

Benouadah *et al.* (2019) zkoumal rozdíl mezi bělí a jádrem v případě borovice halepské *Pinus halepensis*, s tím závěrem, že lipofilní extrakty (pryskyřičné kyseliny, terpeny, mastné alkoholy) byly o něco hojnější v jádrovém dřevě (1,6 %) než v bělí (1,1 %). Obsah kyseliny octové, která je obecně považována za hlavní těkavou kyselinu ve dřevě, byl mírně vyšší v případě bělí v porovnání s jádrem. Nicméně celkově nebyl pozorován významný rozdíl v případě bělí a jádra borovice.

Při porovnání nejčastěji používaných dřevin lze pozorovat, že některé druhy borovic obsahují více extraktiv ve srovnání např. s běžně zpracovávaným smrkem ztepilým (*Picea abies*) (Englund a Nussbaum, 2000). Rozdíly však lze pozorovat

i u identického rodu, např. v případě modřinu opadavého (*Larix decidua*) a modřinu sibiřského (*Larix sibirica*) (Bajer, 2020), jakož i při porovnávání jádrového dřeva různých zástupců modřinu (modřin opadavý – *Larix decidua* var. *decidua*, *L. decidua* var. *sudetica*, japonský modřín – *L. kaempferi*, *L. eurolepis*). Vyšší množství fenolických látek v případě japonských druhů silně korelovalo s vyšší odolností vůči rozpadu (Gierlinger *et al.*, 2004). Podle šetření Forsthubera *et al.* (2017), obsahuje sibiřský modřín více extraktů, jako jsou pryskyřičné kyseliny, monoterpenoidy a flavonoidy než modřiny evropské, což upřednostňuje toto dřevo k použití v exteriéru.

Obdobně pak obsahuje douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii*) hlavně pryskyřičné kyseliny, flavonoidy a třísloviny v jádrovém dřevě, což jí zajišťuje dobrou přirozenou trvanlivost (Donaldson *et al.*, 2019). Dřevo z jedlého kaštanu (*Castanea sativa*) a eukalyptu (*Eucalyptus sp.*) obsahuje hlavně fenoly, ellagitanin (Eichhorn *et al.*, 2017), glyceridy a flavanoly (Benouadah, 2018). Obsah fenolických složek se značně pohybuje od 1,3 do 7 % v závislosti na lokalitě růstu stromu a na konkrétním druhu (Zahri *et al.*, 2008). V tomto směru byly pozorovány významné rozdíly v obsahu těkavých organických sloučenin, zejména v případě borovic (Nascimento *et al.*, 1995). Dix *et al.* (2004) uvedl, že při analýze dřeva borovic bylo pozorováno vyšší množství těkavých organických sloučenin v případě vzorků jádrového dřeva než u vzorků bělí. V návaznosti na to se emise těkavých organických sloučenin v případě borového dřeva mohou měnit také v průběhu sušení, a to v závislosti na obsahu bělí nebo jádra ve výřezu kmene.

Tato zjištění jsou dále potvrzena ve studii Sivrikaya *et al.* (2019); celkové emise těkavých organických sloučenin u borovice lesní (*Pinus sylvestris*) byly podstatně vyšší u přirozeně vysušeného jádrového dřeva ($413,16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) než ve vysušeném bělovém dřevě ($32,89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$). Zvláště mezi aldehydy byly dominující hexanal a pentanal následovány α -pinenem jako hlavní sloučeninou ze skupiny terpenů. Terpeny jsou skupinou těkavých organických sloučenin, které se za konstantních podmínek mohou uvolňovat ze dřeva po dobu nejméně jednoho roku (Kačík *et al.*, 2012; Hyttinen *et al.*, 2010). Za účelem prokázání některých těchto zjištění jsou v **Tab. 3** uvedeny nejčastěji pozorované VOCs emitované z různých druhů dřevin, jakož i koncentrace těkavých organických sloučenin emitovaných z vybraného – běžně zpracovaného dřeva (Czajka *et al.*, 2020).

Sušením, ať už v přírodních podmínkách nebo umělým, se mění profil těkavých organických sloučenin, které mohou být ze dřeva emitovány, viz **Tab. 4**. Například kyselina octová vzniká při sušení dřeva hydrolýzou acetylových skupin hemicelulózy (Packman, 1960) a furfural se vytváří z xylózy dřeva v silné závislosti na teplotě (Zeitsch, 2000). Dřevo s vyšší hustotou, jako jsou druhy z rodu *Fagaceae* – duby a buky – emituje především velké množství kyseliny octové a mravenčí a méně terpenů, zatímco dřevo s nižší hustotou reprezentované např. topolem osikou (*Populus tremulae*) vypouští méně organických kyselin, ale více terpenů. Sloučeniny, jako jsou jednoduché fenoly, lignany, kumariny nebo polyfenoly, jsou specifické také pro dubové dřevo (Taylor *et al.*, 2011; Zahri *et al.*, 2008; Masson *et al.*, 1996).

Tab. 3 VOCs emitované ze dřeva

Extraktiva / skupina VOCs	VOC	borovice*	smrk*	modřín*	jedle	douglaska	topol	dub	buk	Druh dřeva
		Koncentrace ve zkušební komoře (µg/m ³) bělové/jádrové dřevo	Koncentrace ve zkušební komoře (µg/m ³) bělové/jádrové dřevo	Koncentrace ve zkušební komoře (µg/m ³) bělové/jádrové dřevo						
Terpeny	<i>α-pinen</i>	3459/294 An <i>et al.</i> , 2011 Englund a Nussbaum, 2000 Hytinen <i>et al.</i> , 2010 Makowski <i>et al.</i> , 2006 Manninen <i>et al.</i> , 2002 Roffael, 2006 Sivrikaya, 2019	119/320 Englund a Nussbaum, 2000 Hytinen <i>et al.</i> , 2010 Wajs <i>et al.</i> , 2007	126/509 Liu <i>et al.</i> , 2012	Kačík <i>et al.</i> , 2012 Sutton <i>et al.</i> , 1997	Baumann <i>et al.</i> , 1999				Ref.
	<i>β-pinen</i>	13/16 Englund a Nussbaum, 2000 Manninen <i>et al.</i> , 2002 Roffael, 2006 Sivrikaya, 2019	-/74 Hytinen <i>et al.</i> , 2010 Wajs <i>et al.</i> , 2007	4/14	Kačík <i>et al.</i> , 2012 Sutton <i>et al.</i> , 1997	Baumann <i>et al.</i> , 1999				
	<i>kamfen</i>	23/10 Roffael, 2006 Englund a Nussbaum, 2000 Hytinen <i>et al.</i> , 2010 Manninen <i>et al.</i> , 2002	<1/- Hytinen <i>et al.</i> , 2010 Wajs <i>et al.</i> , 2007	<1/6 Liu <i>et al.</i> , 2012	Kačík <i>et al.</i> , 2012 Sutton <i>et al.</i> , 1997					
	<i>Δ³-karen</i>	108/40 An <i>et al.</i> , 2011 Englund a Nussbaum, 2000 Hytinen <i>et al.</i> , 2010 Manninen <i>et al.</i> , 2002 Roffael, 2006 Sivrikaya, 2019	63/45 Hytinen <i>et al.</i> , 2010 Wajs <i>et al.</i> , 2007	17/16 Liu <i>et al.</i> , 2012	Kačík <i>et al.</i> , 2012 Sutton <i>et al.</i> , 1997	Baumann <i>et al.</i> , 1999				
	<i>Limonen</i>	5/<1 An <i>et al.</i> , 2011 Roffael, 2006 Sivrikaya, 2019 Manninen <i>et al.</i> , 2002	30/19 Englund a Nussbaum, 2000 Hytinen <i>et al.</i> , 2010 Wajs <i>et al.</i> , 2007	13/7	Kačík <i>et al.</i> , 2012 Sutton <i>et al.</i> , 1997	Baumann <i>et al.</i> , 1999				

Tab. 3 VOCs emitované ze dřeva – pokračování

Extraktiva / skupina VOCs	VOC	borovice*		smrk*		modřín*		jedle	douglaska	topol	dub	buk	Druh dřeva
		Koncentrace ve zkušební komoře (µg/m ³) bělové/jádrové dřeva	Sivrikaya, 2019 Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Manninen <i>et al.</i> , 2002	Koncentrace ve zkušební komoře (µg/m ³) bělové/jádrové dřeva	Wajs <i>et al.</i> , 2007	Koncentrace ve zkušební komoře (µg/m ³) bělové/jádrové dřeva	Sun <i>et al.</i> , 2020						
Aldehydy	Benzaldehyd	<1/6	Sivrikaya, 2019 Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Manninen <i>et al.</i> , 2002	<1/1	Wajs <i>et al.</i> , 2007	7/3	Sun <i>et al.</i> , 2020			Hyttinen <i>et al.</i> , 2010			Ref.
	Dekanal	11/16	Sivrikaya, 2019 Manninen <i>et al.</i> , 2002	–	Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Wajs <i>et al.</i> , 2007	7/–			Hyttinen <i>et al.</i> , 2010				
	Furfural	/	Sivrikaya, 2019 Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Manninen <i>et al.</i> , 2002	/	Hyttinen <i>et al.</i> , 2010	/			Hyttinen <i>et al.</i> , 2010				
	Hexanal	4/162	An <i>et al.</i> , 2011 Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Manninen <i>et al.</i> , 2002 Roffael, 2006 Sivrikaya, 2019	–/17	Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Wajs <i>et al.</i> , 2007	8/24	Liu <i>et al.</i> , 2012 Sun <i>et al.</i> , 2020		Hyttinen <i>et al.</i> , 2010	Cecchi, 2014			
	Nonanal	4/12	Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Manninen <i>et al.</i> , 2002	4/12	Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Wajs <i>et al.</i> , 2007	7/10	Liu <i>et al.</i> , 2012 Sun <i>et al.</i> , 2020		Hyttinen <i>et al.</i> , 2010				
	Oktanal	1/7	Manninen <i>et al.</i> , 2002 Sivrikaya, 2019	<1/–		5/5			Hyttinen <i>et al.</i> , 2010				
	Pentanal	–	Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Manninen <i>et al.</i> , 2002 Sivrikaya, 2019	–		–/18			Hyttinen <i>et al.</i> , 2010				
	Formaldehyd		Böhm <i>et al.</i> , 2012b Schäfer a Roffael, 2000		Böhm <i>et al.</i> , 2012b Schäfer a Roffael, 2000				Böhm <i>et al.</i> , 2012b	Böhm <i>et al.</i> , 2012b Roffael, 2006	Böhm <i>et al.</i> , 2012b		
Kyseliny	Kyselina octová	/	An <i>et al.</i> , 2011 Hyttinen <i>et al.</i> , 2010 Manninen <i>et al.</i> , 2002	/	Hyttinen <i>et al.</i> , 2010	/	Liu <i>et al.</i> , 2012 Sun <i>et al.</i> , 2020			Hyttinen <i>et al.</i> , 2010	Cecchi, 2014 Risholm-Sundman <i>et al.</i> , 1998	Risholm-Sundman <i>et al.</i> , 1998	

Pozn.: skupina VOCs (s nejvyšší abundancí) emitovaných z různých druhů dřeva zahrnujících koncentrace VOCs stanovené v případě bělí a jádra po 31 dnech. Hodnoty jsou založené na studii od Czajka *et al.* (2002). Některé další látky jako např. Thymol, Myrtenal, Thujen, Terpinen nebo Terpineol byly detekované pomocí GC-MS.

* nejčastěji průmyslově zpracovávané dřeviny

Tab. 4 Množství emise organických kyselin a aldehydů ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) ze dřeva topolu (*Populus tremula*), smrku (*Picea abies*) a borovice (*Pinus sylvestris*) při vystavení rozdílným teplotním podmínkám (Hyttinen *et al.*, 2010)

Vzorek dřeva	Den odběru vzorku (2 až 20)					
	2	3	6	10	15	20
<i>Topol (přirozené sušení)</i>	448	266	236	231	213	200
<i>Topol (termální úprava)</i>	105	95	63	36	91	76
<i>Smrk (přirozené sušení)</i>	25	36	27	26	26	16
<i>Smrk (termální úprava)</i>	77	49	66	44	73	63
<i>Borovice (přirozené sušení)</i>	38	54	48	142	72	109
<i>Borovice (termální úprava)</i>	40	58	51	155	76	125

Pozn.: Přirozené sušení vybraných druhů dřeva probíhalo při shodných podmínkách (23 °C po dobu 2-3 hod), termální úprava byla provedena při 190 °C-212 °C po dobu 2-3 hod. Vzorky byly uloženy do zkušebních komor. Vzorkování pro zjištění emise VOCs bylo realizováno pomocí termální desorpce na Tenax GR, vzorky byly analyzovány pomocí GC-MS.

3.2.5.2 VOCs z nátěrových hmot

Emise VOCs z nátěrových hmot a povrchových úprav představují samostatné obsáhlé téma, v němž rozsáhlý výzkum realizovala Tesařová (2002), která komplexně zkoumala interakce nátěrových látek s nosičem v podobě smrkového masivu, DTD dýhované bukem a nánosu nátěru na inertní sklo. Byly porovnány emise z nitrocelulóзовé (NC) nátěrové hmoty, z vodouředitelného (VŘ) laku na bázi akrylátových disperzí a akrylátového nátěru vytvrzovaného UV zářením.

VOCs se z nátěrových hmot uvolňují během zpracování při zasychání, ale též dlouhodobě jako zbytkové emise. Největší množství emise VOCs se při nánosu nátěrové hmoty odpařuje při aplikaci NC nátěrů, ty vykazují také nejdelší dlouhodobé emise při aplikaci na dýhovanou DTD. Nejvíce emise při procesu zasychání (2 hodiny po nánosu) je pak z VŘ nátěrů na skle, následuje vodouředitelný nátěr na dýhované DTD, zatímco většina rozpouštěděl z NC je již odpařena. UV vytvrzované nátěry pak neemitují žádné VOCs, a to ani v průběhu času. Svou úlohu v množství emise VOCs má také podkladový materiál a jeho interakce s nátěrovou hmotou. Například součet celkové emise z dýhované desky a nánosu NC nátěru na skle je výrazně nižší než emise interakce dýhované desky a NC nátěru, kde dochází k chemické reakci mezi materiály – nátěrem a nosičem, a tudíž ke vzniku dalších VOCs z této reakce plynoucích. Nejčastěji pozorovanými skupinami látek byly alifatické uhlovodíky, alifatické alkoholy, aldehydy, ketony a aromatické uhlovodíky.

Další autoři sledovali emise VOCs z polyuretanových nátěrů na vodní bázi (Scrinzi *et al.*, 2011), alkydová silnovrstvá a tenkovrstvá lazura, akrylátová disperze a emulze na dřevě smrku a borovice byly sledovány jako nátěry s deklarovaným nízkým obsahem VOCs (Meijer a Militz, 2000).

Ve vnitřním prostředí budov je pak stanovení emise VOCs z nátěrových hmot zásadní, ať už se jedná o dokončování nábytku, podlah či obkladů. S ohledem na široký záběr tématu však nebyly nátěrové hmoty v této disertační práci hlouběji zkoumány.

Pro rostlé dřevo s potenciálem využití v interiéru budov je uvažována ochrana prostřednictvím termální úpravy. Alternativou by pak mohly být přírodní vosky a oleje, např. olej ze lněného semínka, sójových fazolí nebo fazole tunky, u nichž lze dle Tang *et al.* (2021) očekávat nulovou emisi VOCs.

3.2.5.3 VOCs z lepidel

Lepidla neboli adhesiva jsou nedílným komponentem při výrobě MnBD, ale také v případě nosných konstrukčních prvků ve dřevostavbách. Podle Agentury pro ochranu životního prostředí (EPA) patří lepidla, nátěrové hmoty (Qi *et al.*, 2019) a další typy povrchových úprav mezi zdroje emisí těkavých organických sloučenin, které mohou emitovat do prostoru a znečišťovat tak vnitřní ovzduší (REED, 1996). Grand View Research uvádí, že kvůli obavám o životní prostředí a zdraví se dnes však používají méně škodlivé chemické látky a emise VOCs z aditiv, lepidel, nátěrových hmot a polymerů se neustále snižují. Porovnáním lepidel používaných při výrobě dřevovláknitých desek se střední hustotou (dále MDF) bylo zjištěno, že nejvyšší emise VOCs má močovinoformaldehydová (dále UF) pryskyřice, zatímco lepidla na bázi melamin formaldehydu (dále MF) měla emise nižší; nejnižší emise pak byla pozorována v případě polyvinylacetátu (dále PVAc) (Madureira *et al.*, 2016). MF lepidla a fenol-formaldehydová (dále PF) lepidla použitá ve výrobě MDF a DTD obecně přispívají k vysokému množství VOCs ve vnitřním prostředí (Tran *et al.*, 2020).

Byly realizovány pokusy o substituci některých chemických složek v lepidlech, např. fenolu v případě fenol-formaldehydového lepidla pyrolýzním bio-olejem. Tyto vedly k relativně uspokojivým výsledkům z hlediska emise VOCs ve srovnání s konvenčně používaným lepidlem, nicméně emise formaldehydu se navýšila 3,5-4,4krát (Jia *et al.*, 2020). Další alternativní přístupy vedly například k přidání pryskyřice ze skořápek kešu ořechů do běžně užívaného PVAc lepidla (Kim, 2010).

Obecně však dnes s ohledem na požadavky legislativy a všeobecný tlak ze strany spotřebitelů dochází při výrobě MnBD k redukci VOCs díky použití aditiv a lepidel na vodní bázi.

3.2.5.4 VOCs z materiálů na bázi dřeva

Produkty ze dřeva, zejména deskové materiály na bázi dřeva a kompozitní materiály se v poslední době staly diskutovaným environmentálním tématem, neboť jsou velmi pravděpodobně hlavním zdrojem aldehydů (včetně Fd) a terpenů v nově postavených domech (Hodgson *et al.*, 2002). Jelikož výroba DTD a ostatních materiálů na bázi dřeva patří v posledních letech mezi rutinní procesy v dřevařském odvětví, stávají se VOCs, které emitují z desek na bázi dřeva, středem zájmu, poněvadž jsou považovány za jednu z hlavních příčin špatné kvality vnitřního prostředí. Jejich analýza má pak velký význam právě díky diskutovanému negativnímu dopadu na lidské zdraví (Liu a Zhu, 2014; He *et al.*, 2012). Vzhledem k tomu, že většina MnBD se používá nejen jako stavební materiály, ale také k vybavení vnitřních prostor budov, může znečištění

vnitřního ovzduší způsobené těmito materiály vést až k již zmiňovanému SBS (Liu *et al.*, 2010; Roffael, 2006). Někteří výrobci materiálů na bázi dřeva si proto stanovili jako hlavní prioritu směřování k produkci materiálů, které budou tzv. přátelské, budou vykazovat nižší obsah VOCs, a budou tudíž více atraktivní pro určitou skupinu cílových zákazníků (Baumann *et al.*, 1999). Ačkoli He *et al.* (2012) tvrdí, že množství emise VOCs je možné ovlivnit především výběrem surového materiálu, kdy jsou třísky prezentovány jako primární zdroj emisí VOCs při výrobě desek na bázi dřeva, a emise VOCs nejsou spojovány s lepidly a aditivami použitými v procesu výroby, podstatný význam je také přikládán modifikaci výrobních postupů. Hill, Norton a Kutnar (in Ansell, 2015) naopak uvádějí, že emise VOC z materiálů na bázi dřeva mohou být zapříčiněny nejen dřevem samotným, ale také právě použitými lepidly. VOCs poté emitují z desek při zahřátí v průběhu lisování. Lisovací parametry jako výrobní krok jsou proto dalším faktorem ovlivňujícím emisi VOCs z desek na bázi dřeva (Liu *et al.* 2012).

V dřevozpracovatelském průmyslu v oblasti produkce materiálů na bázi dřeva začíná cyklus emisí VOCs již v místě růstu stromu jako suroviny, tedy v lese, a pokračuje do finálního meziprojektu, kdy jsou dřevěná vlákna, třísky, nebo dýha spojeny různými chemickými sloučeninami a přísadami (Roffael, 2006; Xi *et al.*, 2017; Irle a Barbu, 2010). Tyto, zpravidla plošné materiály, jsou pak rozhodujícími komponenty následné výroby nábytku, kde se dodatečně používají klihy, lepidla, ředidla, konzervační prostředky a nátěry (Tong *et al.*, 2018).

Stávající studie poukázaly na výskyt široké škály VOCs v materiálech na bázi dřeva zahrnující aceton, benzen, hexanal, terpen a toluen. Při zkoumání více druhů materiálů na bázi dřeva a jejich složek bylo zároveň pozorováno různé složení emitovaných VOCs. Analýza úniku VOCs od Notheima *et al.* (2002) stanovila, že celkový poměr emisí z dýhovaných výrobků s nosičem ze dřeva byl výrazně vyšší než celková emise výrobků ze dřeva s laminovaným povrchem. K tomuto dochází použitím základového nátěru a kyselinou vytvrzovaného vrchního nátěru, který se aplikuje jako povrchová úprava dýhy. Množství emise VOCs z materiálů na bázi dřeva proto závisí na použitém druhu dřeva, jakož i na aditivech, výrobních faktorech a podmínkách při sušení, lisování za tepla a zvýšeného tlaku, následném skladování atd. (Roffael, 2006). Bylo prokázáno, že dřevěné částice při sušení emitují převážně terpeny (Johansson *et al.*, 2004), které jsou také zdrojem emisí při výrobě desek na bázi dřeva – klihy a lepidla zpravidla tyto látky neobsahují (Sun *et al.*, 2020). V rámci studie He *et al.* (2012) bylo prokázáno, že UF pryskyřice používaná při výrobě MDF má nejnižší celkový obsah těkavých organických sloučenin, zatímco dřevní štěpky mají nejvyšší. MF lepidla pak byla zkoumána ve studii Böhma *et al.* (2012b) při zjišťování emisí formaldehydu z různých dřevních surovin i MnBD. Byl vyvozen závěr, že druhy dřeva, stejně jako postup jeho zpracování, jsou klíčovými faktory ovlivňujícími emise formaldehydu (Kirkeskov *et al.*, 2009; He *et al.*, 2012; Gross *et al.*, 2017).

Ohlmeyer *et al.* (2008) poukazuje na potenciál využití buku lesního, který se jeví jako lokálně dostupná dřevina s nejnižší koncentrací VOCs. Proces jeho využití pro

výrobu OSB s sebou však nese nutnost nákladné modifikaci výrobních postupů a další otazníky spojené např. s mechanicko-fyzikálními vlastnostmi takových desek. Nevhodnost jeho použití pak potvrzuje Böhm *et al.* (2012), který detekoval šestkrát vyšší emise formaldehydu z buku lesního (*Fagus sylvatica*) ve srovnání s topolem, dubem nebo borovicí (84, 14, 14, respektive $16 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$); zároveň však uvádí, že významný pokles emise formaldehydu lze ve zkoumaných materiálech pozorovat během dvou týdnů od výroby. Liou *et al.* (2010) zdůrazňují vliv technologických parametrů při zpracování dřeva na emise VOCs při výrobě modřinových DTD. Koncentrace a míra nárůstu emise VOCs byly významně ovlivněny teplotou a dobou lisování za tepla. Zvýšení teploty vede zpočátku ke zvýšení celkové emise VOCs, která se poté během prvních 60 min zahřívání dramaticky sníží. Vyšší hustota, tloušťka a obsah pryskyřic v modřinových DTD byly považovány za primární důvody vedoucí k vyšším emisím terpenů a aldehydů a k celkovému nárůstu VOCs.

Podobný trend byl pozorován v případě prodlužování lisovacího času. Tento jev je spojován s obsahem extraktiv ve dřevě modřinu. Studie Sun *et al.* (2020) poukazuje v případě modřinových DTD na vliv hustoty, tloušťku desek a obsah lepidel na celkovou koncentraci těkavých organických látek ve vzduchu (dále TVOC) a na emisi jednotlivých VOCs. Nárůst emise terpenů z testovaného materiálu byl pozorován při navýšení hustoty a tloušťky desky, při zvyšování obsahu UF pryskyřice emise VOCs poklesly. Vzhledem k tomu, že se lisovací čas, a tudíž expozice vysokým lisovacím teplotám během výroby prodloužila, celkový objem těkavých organických sloučenin ze všech ostatních vzorků DTD vyrobených v různých výrobních podmínkách se snižoval.

Studie od Baumanna *et al.* (1999) se zaměřuje na emise terpenů ze vzorků DTD a MDF v severní Americe. Ve vzorcích DTD převládaly zejména pineny, kamfen, 3-karen, p-cymen, limonen a borneol – VOCs typické pro dřevo (viz **Tab. 3**). Emise terpenů v případě DTD významně koreluje s použitou dřevinou a extraktivy v ní obsaženými. Nižší emise terpenů byla zjištěna pouze v případě použití rychlerostoucí americké borovice kadidlové (*Pinus taeda*). Bylo také prokázáno, že emise terpenů z DTD a MDF klesají ve zkušební komoře během 4 dnů o 20 až 80 %. Zajímavý postřeh byl učiněn při srovnání DTD a MDF vyrobených ze stejné suroviny. Ve většině DTD byly přítomny 3-karen a pineny, zatímco většina těchto sloučenin v MDF chyběla. Důvodem je v tomto případě samotný technologický postup zpracování dřevěných štěpek při výrobě MDF, které jsou přeměněny na vlákna procesem rozvláknování. Teplota v defibrátoru se obvykle pohybuje mezi 160 a 185 °C. Tento proces probíhající za vysoké teploty může iniciovat emisi terpenů ze vstupního materiálu, což u konečného výrobku vede k nižším emisím. Podle tohoto vysvětlení terpeny s nižšími body varu, jako jsou α - a β -pinen (bod varu 155 °C a 165 °C), v emisích MDF zcela chyběly, zatímco terpeny emitující při vyšších teplotách, jako je limonen (bod varu 176 °C), byly přítomny pouze v některých vzorcích. Liou *et al.* (2010) pak uvádí jako hlavní VOCs emitující z DTD kyselinu octovou, α -pinen a benzen, zejména po lisování za zvýšené teploty.

Terpeny a aldehydy; konkrétně pentanal a hexanal, které se uvolňují při sušení plochých třísek pro OSB, jsou VOCs pozorované při analýze emise z desek z orientovaných plochých třísek (Makowski a Ohlmeyer, 2006). Su *et al.* (1999) a Svedberg *et al.* (2004) uvádějí, že tyto a další aldehydy jsou oxidační produkty z dřevních částic, které vznikly během procesu sušení dřeva. Emise hexanalů je podporována sušením při zvýšené teplotě a snižuje se v průběhu času, zatímco jsou desky klimatizovány (Wilke *et al.*, 2013).

Specifickou kategorií výrobků na bázi dřeva jsou dřevěné podlahy. Dubové parkety jako často používaný stavební materiál byly z hlediska emisí těkavých organických sloučenin považovány za rizikové zejména při aplikaci jako pochozí podlahová vrstva při systémech využívajících podlahového vytápění. Jak popisuje Cecchi (2014), zahřívání může zvýšit emise VOCs. Podlahové parkety jsou považovány za potenciální emitory VOCs díky jejich postupné degradaci, kvůli VOCs obsaženým ve dřevě, VOCs z nátěrových hmot a případně i z lepidel použitých při výrobě vícevrstvých podlah. Například nonanal pochází z autoxidace mastných kyselin obsažených ve dřevě a je růstovým inhibátorem pro dřevokazné houby (Fries, 1960). Přestože je v případě dřevěných podlah mnoho aldehydů emitováno do ovzduší právě v důsledku autoxidace mastných kyselin obsažených ve dřevě, přibývá důkazů, že také chemická reakce mezi ozonem a terpeny, jako je d-limonen nebo α -pinen může vést k produkci řady mnohých aldehydů (Spengler *et al.*, 2001). V případě vícevrstvých dřevěných podlah stojí za povšimnutí, že nosná překližovaná deska byla zmiňována jako zdroj α -pinenu, nonanalů, oktanalů, pentanalů a hexanalů, jakožto převažujících sloučenin (Hodgson *et al.*, 2002; Su *et al.*, 1999; Weisel *et al.*, 2005). Základní překližované vrstvy vícevrstvé podlahy složené zpravidla z měkkého dřeva jehličnanů, měly obecně srovnatelné emise s DTD vyrobené z jehličnaté suroviny (Baumann *et al.*, 1999).

Na základě předchozích tvrzení lze dřevo považovat za hlavní zdroj VOCs v případě jeho použití pro výrobu MnBD. Zpracovatelské postupy a suroviny pro výrobu DTD se testují s cílem vyrábět stavební materiály šetrnější k životnímu prostředí. Absence lepidel v dřevovláknitých deskách a využití různých alternativních obnovitelných materiálů se jeví jako vhodné řešení (da Silva *et al.*, 2017; Uitterhaegen, 2016). Bez ohledu na použitá aditiva, lepidla, nátěrové látky a potenciální modifikace, jejichž vliv je dále rozebírán v navazujících kapitolách, lze pak jako alternativu ke dřevu – dezintegrovanému dřevu – uvažovat jednoleté rostlinné materiály. Jejich aplikace se dnes testuje díky jejich potenciálním výhodám, jimiž jsou krátký životní cyklus; získávání suroviny přirozenou cestou a možnost její udržitelnější produkce; a schopnost rychlejší sekvence atmosférického uhlíku (Adamová *et al.*, 2019).

3.2.5.5 VOCs z alternativních rostlinných vláken

Typ a množství těkavých organických sloučenin uvolňovaných ze dřeva nebo jiného rostlinného materiálu přirozeně závisí na typu rostliny, jejím stáří, interakci s biotickými a abiotickými faktory, nemocech, kvalitě půdy, výživě, zavlažování, povětrnostních

a klimatických podmínkách, zdravotním stavu rostliny, jakož i době jejího životního cyklu (např. hibernace) v okamžiku produkce lignocelulózového materiálu (Stachowiak-Wencek a Pradzyński, 2014; Wolkoff, 1999). Kromě celulózy, hemicelulózy a ligninu se dřevo a jiná rostlinná vlákna skládají z organických chemikálií s nízkou molekulovou hmotností, extraktiv (Chen, 2014). Jak bylo v kapitole 3.2.5.1, jejich obsah se ve dřevě pohybuje od 0,5 do 20 % hmotnosti (hm.) (Hill, 2006). V případě přírodních vláken je to od 1 do 3 % hm. (Stachowiak-Wencek a Pradzyński, 2014). Za předpokladu, že dojde k minimalizaci degradace ligninu a celulózy během procesu lisování základních dřevěných komponent (třísek, vláken apod.), lze extraktiva považovat za primární zdroj emisí VOCs (Roffael, 2016).

3.2.6 VOCs jako potenciální zdravotní riziko

S ohledem na lidské zdraví a blaho hodnotí Německá komise pro zdravotní hodnocení stavebních výrobků (AgBB) účinky emise VOCs ze stavebních materiálů od nepříjemných pachů a podráždění sliznic očí, nosu a hrdla až po účinky na nervový systém a dlouhodobé účinky na lidské zdraví. Do této kategorie patří látky způsobující alergické reakce nebo zhoršující alergické reakce a konkrétně látky s karcinogenním, mutagenním nebo reprotoxickým potenciálem. Společnost AgBB proto uvedla tzv. mezní hodnoty koncentrace – LCI, neboli Lowest Concentration of Interest pro 184 sloučenin, jako jsou terpeny a aldehydy, které se obvykle vyskytují ve stavebních materiálech včetně MnBD. Stanovení mezních hodnot by tak mohlo zajistit výrobu nízkoemisních materiálů z hlediska VOCs (Däumling, 2005).

Mnohé terpeny – alfa-pinen, beta-pinen – a aldehydy – hexanal – jsou považovány za dráždivé pro oči, dýchací systém a kůži (Cecchi, 2014). Dekanal, nonanal a furfural způsobují podráždění očí a kůže. Alfa-pinen může být škodlivý při vdechování a při styku s kůží. Podle Mølhav (1991) vedou koncentrace těkavých organických sloučenin do 25 000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ k bolestem hlavy a dalším neurotickým symptomům, tedy škodlivým pro nervový systém. Studie navíc potvrzují, že děti jsou více citlivé na kontakt s látkami znečišťujícími ovzduší než dospělí. Jsou současně zranitelnější vůči škodlivým účinkům látek znečišťujících ovzduší, protože v poměru k jejich tělesné velikosti dýchají více vzduchu než dospělí. (Ashmore a Dimitroulopoulou, 2009).

Na druhé straně, Gminski *et al.* (2013) testoval dopad emisí těkavých organických sloučenin borového dřeva a OSB na dráždivost lidského smyslového vnímání a nezjistil žádné nežádoucí účinky na oči, nos, hrdlo, horní cesty dýchacích cest nebo na funkci plic po expozici i nejvyšším hladinám VOCs (koncentrace až 13 000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Frekvence mrkání očí jako parametr podráždění nebyla během expozice ani po ní ovlivněna. Smyslové vnímání zápachu bylo jediným zjistitelným parametrem – zápach borového dřeva i OSB byl považován spíše za „příjemnější“ než „nepříjemný“. Studie Institute of Health Technology and Prevention Research navíc propaguje pozitivní účinek esenciálních olejů (destilovaná esence aromatické rostliny obohacená těkavými látkami)

borovice limby (*Pinus cembra*) z nábytku a interiérových obkladů na lidské zdraví, pokud jde o zmírnění stresu, zklidnění dechu a snížení frekvence srdečního tepu vedoucích k uvolněným pocitům.

3.2.7 Metody snižování emise VOCs ze dřeva a MnBD

Přítomnost VOCs ze dřeva ve vnitřním ovzduší vzbuzuje stále obavy, a proto jsou nadále hledány způsoby, jak snížit jejich uvolňování nejen z interiérového vybavení, ale především ze samotných částí stavebních konstrukcí.

Jednou z metod vedoucí ke snížení emisí VOCs z materiálů je termická modifikace (Huang *et al.*, 2019). Kačík *et al.* (2012) uvedl, že termická modifikace při teplotě 60 °C akceleruje emise terpenů a při dosažení teploty 120 °C vede k jejich úplnému odstranění. Termická modifikace smrkového a borového dřeva významně snižuje emise VOCs a současně mění jejich složení v porovnání s neošetřeným nebo přirozeně vysušeným dřevem. Zejména emise terpenů v případě smrku a borovice klesají během procesu termické úpravy. Při porovnání jehličnanů a měkké listnaté dřeviny topolu, vede tepelná modifikace v obou případech ke snížení emisí hexanalů, ale současně vyvolává nárůst emise furfuralu. Termickou modifikaci dřeva lze přesto použít jako vhodnou metodu pro zmírnění emisí VOCs, což vede ke snížení potenciálního zdravotního rizika pro člověka způsobeného expozicí VOCs. Tepelná modifikace dřeva tak dělá ze dřeva vhodný a nezávadný materiál pro použití ve vnitřním prostředí (Hyttinen *et al.*, 2010).

Druhou alternativou vedoucí ke snížení emise VOCs týkající se materiálů na bázi dřeva je optimalizace výrobních parametrů (He *et al.*, 2012), a to zejména s ohledem na teplotu a lisovací čas (Masson *et al.*, 1996). Jiang *et al.* (2017) prokázali, že zahřívání DTD (už při 50 nebo 60 °C) významně snížila emise formaldehydu a dalších těkavých látek. Prodloužení tzv. bake-out času a zvýšení teploty zaručuje získání materiálu, který při pokojové teplotě uvolňuje méně VOCs.

Primárním výrobním parametrem je nicméně vstupní surovina. Wilke *et al.* (2013) studují tuto skutečnost v případě jádrového a bělového dřeva borovice. Zdůrazňují, že by zpracování ryze jádrového dřeva borovice vedlo ke snížení emisí těkavých látek, nicméně podotýkají, že toto je v praxi nerealizovatelné, a tudíž by měla být produkce OSB přednostně realizována ze dřeva smrkového, které má obecně nižší emise VOCs.

Další možností je chemická modifikace. Na základě výzkumu realizovaného v souladu s požadavky německé komise pro hodnocení zdravotní nezávadnosti stavebních materiálů (AgBB) bylo vyhodnoceno, že přímá aplikace kyseliny citronové nebo kyseliny vinné na třísky při procesu výroby OSB vede k výraznému snížení emise aldehydů – zejména hexanalů (Wilke *et al.*, 2013). Zkrápění povrchu desek kyselinou citronovou a kyselinou vinnou ve formě kyselých vodných roztoků a použití vodného roztoku alkalického hydrogenuhličitanu sodného (Fiore *et al.*, 2016) bylo s cílem snížení

emisi VOCs ze stavebních materiálů na bázi dřeva aplikováno také v případě této disertační práce.

Existují nicméně i další alternativy vedoucí ke snížení těkavých organických sloučenin uvolňovaných z přírodní složky MnBD – ze dřeva. Snahy o redukcí těkavých organických sloučenin z materiálů a konstrukcí na bázi dřeva byly v minulosti realizovány různě; jednou z metod pro snížení emise VOCs může být použití nátěrů obsahujících rozptýlené nanočástice s vysokým poměrem mezi povrchem a objemem. Tato aplikace může vést ke snížení celkové emise těkavých organických sloučenin až o 38,6 % (Liu a Zhu, 2014). Další postupy, jako již zmíněná aplikace pryskyřice ze skořápky kešu ořechů na javorovou překližku (Kim, 2010), využití absorpční schopnosti ostatních strukturálních složek (da Silva *et al.*, 2016) nebo dokonce přímísení látek jako je pucolán (přidávání pucolánového popela přímo do vláknitého surového materiálu MDF) vedlo ke snížení celkové emise VOCs (Kim, 2009). Simon *et al.* (2020) prokázal, že odpad z výroby koriandru může sloužit jako nízkoemisní surovina pro výrobu DTD. V případě formaldehydu bylo emitováno 300–600krát méně ve srovnání s běžnou MDF a DTD.

Byly zkoumány a aplikovány mnohé metody vedoucí ke snížení emise VOCs, Jiang *et al.* (2017) však upozorňuje na další důležité aspekty, kdy jedním z nich je průběh analýzy již odebraných vzorků vzduchu nasyceného těkavými látkami. Zabezpečení efektivnější výměny vzduchu ve větrané testovací komoře, která simuluje podmínky ve vnitřním prostředí budov, může významně ovlivnit výsledné hodnoty.

3.3 Instrumentální metody stanovení VOCs

Vezmeme-li v úvahu přístrojové metody používané k určení těkavých organických sloučenin, používá se k separaci a identifikaci VOCs plynová chromatografie–hmotnostní spektrometrie (dále GC-MS). Pro stanovení formaldehydu je pak aplikována kapalinová nebo plynová chromatografie, často po derivatizaci. Pokud se jedná o vyhodnocení koncentrace sloučenin v pevném materiálu, lze použít ověřené extrakční techniky pro extrakci těkavých látek. Pro monitorování množství sloučenin ve vymezeném prostoru vzduchu se používají rovnovážné techniky, které reflektují jejich přítomnost v daném prostoru nebo definují míru emise z pevného materiálu do okolního prostředí (Adamová *et al.*, 2020).

V otázce přístrojových analytických metod používaných ke stanovení VOCs je nejčastěji používaná plynová chromatografie spojená s hmotnostní spektrometrií; případně jinou detekční metodou. Tato metoda se používá pro separaci a následnou detekci (a případnou identifikaci a/nebo kvantifikaci) látek ze vzorku. Výběr vhodné kombinace extrakce těkavých látek, nástřikové techniky, podmínek separace a detekce značně závisí na definovaném cíli analýzy. Pokud je zadáním popis pevného vzorku prostřednictvím složení extrahovatelných těkavých látek, je obvykle provedena tzv. totální extrakce s cílem převést ideálně všechny molekuly z pevného vzorku do jeho

extraktu. Tato extrakce je často podporována zahříváním (extrakce dle Soxhleta, Soxtec, extrakce tlakovou kapalinou – PLE atd.), nebo sonikací, tedy aplikací ultrazvuku pro zvýšení účinnosti extrakce. Po případném přečištění následuje nástřik (zpravidla pomocí autosampleru) do nástřikového prostoru GC-MS.

V případě VOCs emitovaných ze vzorku, tedy vzorkovaných ze vzduchu, se používají rovnovážné techniky sorpce na různé typy sorbentů, následované tepelnou desorpcí odebraných sloučenin do analytického systému. Tento postup se často používá pro sledování vnitřního ovzduší nebo pro stanovení emise sloučenin z různých materiálů (Roffael, 2006; Kačík *et al.*, 2012; Wajs *et al.*, 2006; Sivrikaya *et al.*, 2019; Manninen *et al.*, 2002; Zeitsch, 2000; Liu a Zhu, 2014; Kilic a Altuntas, 2006; Tartagila *et al.*, 2019). Příklady různých analytických přístupů a dříve použitých technik pro stanovení VOCs ze dřeva a MnBD, viz **Tab. 5**.

3.3.1 GC-MS pro detekci VOCs z biomateriálů a MnBD

Plynová chromatografie (GC) je dnes nejvýznamnější analytickou metodou pro analýzy organických chemických látek – pro stanovení jednotlivých nízkomolekulárních látek v komplexních směsích. Pro detekci sloučenin lze použít konvenční a rozšířený plamenoionizační detektor (FID), nicméně univerzální a citlivou detekční metodou je hmotnostní spektrometrie (MS), která poskytuje údaje jak pro identifikaci sloučenin na základě jejich hmotnostních spekter, tak i pro jejich kvantifikaci na základě selektivních kvantifikačních a konfirmačních iontů (Hübschmann, 2015). Pro separaci oddělení analytů obsažených ve vzorku je v první řadě třeba zvolit vhodnou GC kapilární kolonu – nejčastěji používanými typy jsou nepolární kolony (5 % nebo 1 % modifikovaného polydimethylsiloxanu) nebo polární voskové kolony typu WAX. Podle mezinárodní normy 16000-6 (2011) pro stanovení VOCs ve vnitřním prostředí pomocí zkušební komory při aktivním odběru vzorku na Tenax TA[®] a následné termální desorpci za použití GC-MS nebo MS-FID je vhodné používat kolony o délce 30-60 m, které se vyznačují vnitřním průměrem 0,25 až 0,32 mm a tloušťkou stacionární fáze 0,25 až 0,5 μm . Prakticky je však při zachování separační schopnosti použitelná i kolona o délce 15-20 m. Komplexní dvourozměrná plynová chromatografie (GC \times GC) umožňuje dosáhnout lepší citlivosti díky kombinaci dvou kolon obvykle s odlišnou polaritou a mezikroku, kdy je eluovaná látka z první kolony fokusována v modulátoru před vstupem na druhou kolonu. Při stejném látkovém množství naneseném na kolonu se tak získá pík s větším parametrem signál/šum. Dále jsou separací v druhé dimenzi odděleny koextrahované látky (ale i stopy rozpouštědla a látky pocházející z degradace kolony při vyšších teplotách) od látek cílových, což opět zvyšuje citlivost. Současně s tím jsou lépe separované sloučeniny (po aplikaci GC \times GC) lépe identifikovatelné, jelikož poskytují čistší spektra. Na druhou stranu tato instrumentace vyžaduje oproti jednodimenzionálnímu provedení upravenou GC pec o modulátor, druhodimenzionální pec a hmotnostně spektrometrický detektor, schopný rychlého sběru dat (min. cca 100 Hz).

Tab. 5 Metody použité pro stanovení emise VOCs ze dřeva a MnBD

Materiál	Zkoumaný cílový záměr	Použitá analytická metoda	Zavedení vzorku	Kapilární kolona (délka × vnitřní průměr; tloušťka filmu)	Reference
<i>Larix sibirica</i> vs. <i>Larix decidua</i>	variabilita složení VOCs, intenzita VOCs	GC-FID, GC-MS	SPME: DVB-CAR-PDMS - 50:30 μm	SLB-5 (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm)	Bajer <i>et al.</i> (2020)
<i>Picea abies</i>	variabilita složení VOCs, porovnání metod	GC-MS	SPME: DVB-CAR-PDMS - 50:30 μm; CAR-PDMS - 75 μm; CW-DVB - 70 μm; PDMS-DVB - 65 μm / dynamický HS / hydrodestilace	HP-5 (30 m × 0.32 mm; 0.25 μm)	Wajs <i>et al.</i> (2006)
<i>Larix gmelinii</i>	variabilita složení VOCs, porovnání metod	GC-MS	SPME: PDMS - 100 μm/ statický headspace	TR-V1 (30 m × 0.25 mm; 1.4 μm)	Liu <i>et al.</i> (2012)
<i>Serpula lacrymans</i> , <i>Coniophora puteana</i> a <i>Pinus sylvestris</i>	variabilita složení VOCs, porovnání metod	GC-MS	SPME: PDMS - 100 μm; polyakrylát - 85 μm, Tenax GR trubičky	HP-1, HP-5, HP-Innowax (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm)	An <i>et al.</i> (2011)
náhodná dřevní biomasa	extrakce a identifikace furfuralu	GC-MS	autohydrolyzáza; SPME: DVB-CAR-PDMS; *	HP-5 MS (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm)	Senila <i>et al.</i> (2013)
dřevěné parkety	variabilita složení VOCs,	GC-MS	SPME: DVB-CAR-PDMS - 50:30 μm	HP-5MS (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm)	Cecchi (2014)
<i>Abies alba</i> vs. <i>Fagus sylvatica</i>	porovnání VOCs podle metod	GC-MS	skleněná trubička pro TD & desorbér Turbomatrix 300	DB-5 (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm)	Candelier <i>et al.</i> (2013)
<i>Larix gmelinii</i>	TVOC a VOCs kvantifikace (μg m ⁻³)	GC-MS	skleněný exsíkátor (0.015 m ³) & Tenax TA [®] trubičky	TR-V1 (30 m × 0.25 mm; 1.4 μm)	Sun <i>et al.</i> (2020)
<i>Picea abies</i> , <i>Pinus sylvestris</i> vs. <i>Populus tremula</i>	porovnání TVOC	TCT-GC-MS	malá kovová komora (0,12 m ³) & Tenax GR	HP-5MS (50 m × * ; 0.5 μm)	Hyttinen <i>et al.</i> (2010)
<i>Pinus sylvestris</i>	variabilita složení VOCs, kvantifikace	GC-MS	FLEC (0,00035 m ³) & Tenax TA [®] trubičky	*	Sivrikaya <i>et al.</i> (2019)
<i>Pinus sylvestris</i>	TVOC, relativní poměr (% z celkové emise) různých skupin látek a jednotlivých látek	GC-MS	skleněný kontejner (0.015 m ³) & Tenax TA [®] trubičky	HP-5 (50 m × 0.2 mm; 0.5 μm)	Manninen <i>et al.</i> (2002)
MDF	TVOC emisní poměr (mg m ⁻² h ⁻¹)	GC-MS	malá komora (0,020 m ³) & Tenax TA [®] trubičky	RTX-1 (105 m × 0.32 mm; 3 μm)	Kim (2009)
DTD a MDF z různých dřevin	VOCs kvantifikace	GC-MS	nerezová komora (0,053 m ³) & kryopast	EC-5 (30 m × 0.25 mm; 25 μm)	Baumann <i>et al.</i> (1999)

Tab. 5 Metody použité pro stanovení emise VOCs ze dřeva a MnBD – pokračování

Materiál	Zkoumaný cílový záměr	Použitá analytická metoda	Zavedení vzorku	Kapilární kolona (délka × vnitřní průměr; tloušťka filmu)	Reference
Organická a anorganická izolace	TVOC	GC-MS	nerezová komora (0,058 m ³) & Tenax TA [®] trubičky	fused silica column (25 m × 0.32 mm; *)	Koivula <i>et al.</i> (2005)
OSB z <i>Pinus sylvestris</i>	porovnání emise aldehydů a terpenů z malé a velké komory	GC-MS	skleněný exsikátor (0,023 m ³) a nerezová komora (1 m ³) & Tenax TA [®] trubičky, TDS 3	*	Makowski a Ohlmeyer (2006)
OSB	kvantifikace jednotlivých VOCs	GC-MS	skleněný exsikátor & Tenax TA [®] trubičky	*	Wilke <i>et al.</i> (2013)
nátěrové hmoty ve výrobě nábytku	variabilita složení VOCs, kvantifikace	GC-MS	Tenax TA [®] trubičky	DA-WAX (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm)	Ki <i>et al.</i> (2019)
<i>Pinus sylvestris</i> vs. <i>Picea abies</i>	výskyt a množství monoterpenů	GC-MS	Tenax TA [®] trubičky-aceton & Soxhlet	DB-Wax (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm)	Englund a Nussbaum (2000)
12 různých druhů tropických dřev	kompletní množství extraktů (v % suchého dřeva)	GC-MS	hydroxid sodný & Soxhlet	HP-1 (J&W) (25 m × 0.2 mm; 0.11 μm)	Kilic a Niemz (2012)
<i>Populus cathayana</i> vs. <i>Hevea brasiliensis</i>	individuální VOCs (%)	GC-MS/O	ethanol a toluen & Soxhlet	DB-Wax (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm)	Liu <i>et al.</i> (2018)
<i>Larix gmelinii</i> DTD	individuální VOCs (%)	GC-MS	methylenchlorid & Soxhlet	*	Sutton <i>et al.</i> (1997)
<i>Picea abies</i> vs. <i>Abies alba</i>	kvantifikace individuálních VOCs porovnání metod	GC-FID, GC-MS	ASE vs. destilace párou vs. Soxhlet	DB-5 (30 m × *; *)	Bertaud <i>et al.</i> (2017)
<i>Abies alba</i> Mill.	redukce VOCs jako ochrana před rozkladem dřeva	GC-MS	extrakce pomocí hexanu v třepačce Promax 2020	HP-5 MS (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm)	Kačík <i>et al.</i> (2012)
<i>Quercus alba</i> , <i>Quercus robur</i> vs. <i>Quercus pedunculata</i>	kvantifikace 5 specifických VOCs (cis- and trans-β-methyl-γ-oktalakton, eugenol, vanilin a syringaldehyd)	(DTD)-GC-MS	extrakce dichlormethanem	SPB-1 (50 m × 0.2 mm; 0.25 μm)	Pérez-Coello <i>et al.</i> (1997)
konstrukční materiály	VOCs emise	GC-(FID)-MS	DOSEC-SPME	*	Gross <i>et al.</i> (2017)

* hodnota nebyla specifikována; použité zkratky: TVOC – celková emise VOCs; TD – termální desorpce; DTD – přímá termální desorpce; TCT – termální desorpce s kryopastí; FID – plamenionizační detektor; GC-MS/O – GC-MS/olfaktometrie; FLEC – laboratorní a terénní emisní cela; DOSEC – zařízení pro *in situ* kontrolu emisí

Pro stejný účel lze použít i delší kolony, které však nevyhnutelně prodlužují celkovou dobu běhu analýzy (Hafizoglu a Holmbom, 1995; Kilic a Niemz, 2015; Adamová *et al.*, 2019; Bouchonnet, 2013; Štulík, 2005; Shellie *et al.*, 2000; Adams, 2007). Pro základní měření se obvykle použije kvadrupólový hmotnostní analyzátor. Nicméně pokročilé analyzátory, jako time of flight (TOF), mohou v případě necílového typu analýzy nabídnout mnohé rozšířené vlastnosti. Vyšší schopnost detekce pak může zvýšit průchodnost vzorků, jelikož lze pro chromatografickou separaci použít rychlejší gradient teploty. Kombinace přístrojů, buď kvadrupól a TOF nebo více kvadrupólů mohou zvýšit citlivost stanovení (Adams, 2007).

Při hmotnostní spektrometrické detekci se primárně používá elektronová ionizace za standardizovaných podmínek (ionizační energie 70 eV), protože umožňuje identifikaci chemických sloučenin podle podobnosti změřených hmotnostních spekter s vestavěnými knihovny hmotnostních spekter (NIST, Wiley). Tyto knihovny jsou vytvořeny právě za těchto podmínek. Pro potvrzení identity cílových sloučenin lze použít retenční časy příslušných standardů nebo je možné porovnávat vypočítané Kovatsovy retenční indexy (KI) s údaji z literatury nebo knihoven (Adamová *et al.*, 2019; Kilic a Altuntas, 2006; Štulík, 2005; Macchioni, 2003; Uçar *et al.*, 2003). Množství sloučeniny přítomné v pevném materiálu nebo vypouštěné do vzduchu lze vyjádřit pomocí kalibračních křivek nebo jako ekvivalent jiné vybrané sloučeniny (např. toluenu) (Hyttinen *et al.*, 2010). Pro jednoduchá srovnání lze použít plochy píků jednotlivých sloučenin v chromatogramu celkového iontového proudu (TIC) nebo součet ploch píků (Ewen *et al.*, 2004; Sivrikaya *et al.*, 2019).

3.3.2 Extrakční techniky VOCs a nástřikové techniky

3.3.2.1 Extrakce z pevného vzorku kapalinami

Extrakce z pevné látky pomocí kapaliny je proces získání rozpustné složky z pevného vzorku pomocí kapalného rozpouštědla. Nejčastěji používanými metodami jsou extrakce soxhletovým extraktorem (Bertaud *et al.*, 2017), hydrodestilace a macerace. Poslední jmenovaná metoda může být doplněna protřepáváním nebo ultrazvukem.

Výhoda ultrazvukových vln spočívá ve schopnosti průniku maticí při protržení buněčných stěn a prostoupením rozpouštědla do matrice k extrakci cílových komponent (Cetera *et al.*, 2019; Todaro *et al.*, 2017). Často používanými rozpouštědly jsou n-hexan, alkoholy (etanol, metanol) nebo jiná rozpouštědla, jako je aceton nebo dichlormethan. Podle cíle analýzy se směsi rozpouštědel používají buď ke zlepšení extrakční výtěžnosti, nebo k simulaci specifického rozpouštědla (voda/etanol) např. v případě extrakce VOCs z dřevěných sudů nebo dřevěných štěpek do různých alkoholických nápojů. Při navrhování metody pro cílovou skupinu sloučenin by se měla brát v úvahu variabilní síla různých rozpouštědel. Soxhletův extraktor byl použit např. ve studii Granström (2005) a v řadě dalších studií pro extrakci různých složek vzorků, včetně těkavých a polotěkavých sloučenin (Benouadah *et al.*, 2019; Englund a Nussbaum, 2000; Liu *et*

al., 2010). V zásadě se jedná o proces, kdy se opakovaná extrakce pevného vzorku provádí pomocí kondenzované páry horkého rozpouštědla ve skleněné aparatuře. Když je extrakční komora plná, automaticky se vyprázdní pomocí sifonu. Extrahované sloučeniny se koncentrují v destilační baňce pod extrakční komorou. V posledním desetiletí byly zavedeny alternativní techniky k tradiční Soxhletově aparatuře, které se zaměřují na snižování nákladů a využití postupů šetrnějších k životnímu prostředí. Podobný princip se používá v přístroji Soxtec, jež představuje opakovanou automatizovanou extrakci rozpouštědlem, nebo PLE, které se také říká zrychlená extrakce rozpouštědel (ASE) (Vichi *et al.*, 2007). Na základě srovnání s tradičním Soxhletovým extraktorem je PLE považováno za ekologičtější variantu, protože má podobnou účinnost, je rychlejší a používá nižší množství organických rozpouštědel (Wajs *et al.*, 2006; Azmir *et al.*, 2013; Shen a Shao, 2005; Richter *et al.*, 1996; Flores Péres *et al.*, 2006).

Hydrodestilace se často aplikuje při extrakci silic z různých rostlinných materiálů včetně dřeva. Je také vhodná k extrakci složek polotěkavých látek. Standardně se používají tři hydrodestilační metody: i) přímá destilace vody, je-li materiál v baňce převařen vodou, směs extrahovaných sloučenin a vodní páry je ochlazena a zachycena; ii) šetrnější extrakce vodou a párou, při níž je materiál vystaven páře z vroucí vody, aniž by došlo ke kontaktu extrahovaného materiálu se dnem extrakční baňky, kde může dojít k přehřátí, a iii) přímá extrakce páry, při níž pára vzniká mimo extrakční nádobu, čímž se výrazně zkracuje doba extrakce (Azmir *et al.*, 2013; Manousi *et al.*, 2019; Cowan, 1999; Rassem *et al.*, 2016; Handa *et al.*, 2008;). Při hydrodestilaci je extrahovaný materiál vystaven teplotám blízcím se 100 °C, což může způsobit degradaci termolabilních organických látek. V případě varu s vodou může také dojít k nežádoucí reakci mezi extrahovanými sloučeninami. V závislosti na extrahované matici uvádějí autoři porovnávající extrakci organických rozpouštědel s hydrodestilací, že byla získána podobná kvalitativní data, zatímco v případě extrakce organickými rozpouštědly byl u konkrétních sloučenin lepší kvantitativní výnos (Bouchonnet, 2013; Wajs *et al.*, 2006).

3.3.2.2 Sorpční techniky spojené s termální desorpčí

V oblasti stavebních materiálů je sledována emise skupiny specifických VOCs, viz **Příloha č. 1** dle požadavků kladených na stavební výrobky podle vybraných norem (ITC, 2021):

- **ve zkušební komoře:** ČSN EN 16516+A1 (728012) *Stavební výrobky – Posuzování uvolňování nebezpečných látek – Stanovení emisí do vnitřního ovzduší a ČSN EN ISO 16000-9 (835801) Vnitřní ovzduší – Část 9: Stanovení emisí těkavých organických látek ze stavebních materiálů a nábytku – Metoda zkušební komory*
- **metodou GC-MS:** ISO 16000-6 *Indoor air — Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS or MS-FID*

- **metodou HPLC:** *ISO 16000-3 Indoor air — Part 3: Determination of formaldehyde and other carbonyl compounds in indoor air and test chamber air — Active sampling method*

Veškeré uvedené postupy vycházejí z odběru vzorku vzduchu na sorbent, viz „**Sorpční techniky spojené s termální desorpčí**“, nicméně pro rychlé a citlivé analýzy jsou běžně aplikovány tzv. in situ metody popsané níže, které mají vysokou výpovědní hodnotu a umožňují analýzy velkého počtu vzorků v sekvencích. Tyto metody byly použity také v této disertační práci.

Normativní postupy

Pro stanovení těkavých organických sloučenin ve vnitřním ovzduší byla vyvinuta standardizovaná metoda definovaná v mezinárodní normě ISO 16000-6 (2011). Za tímto účelem se dle ČSN EN ISO 16000-9 (2007) ze vzduchu ve zkušební komoře (vyrobené z nerezavějící oceli nebo skla) odebírají vzorky těkavých látek pomocí kalibrovaného čerpadla a průtokoměru. Předem stanovený objem vzduchu je nasát přes sorbent (obvykle Tenax TA[®], pro totožný účel použili někteří autoři Tenax GR), kde probíhá adsorpce sloučenin v rozmezí n-C₇ až n-C₃₀ (Hübschmann, 2015). Vzorek materiálu, např. DTD nebo masivního dřeva, se vloží do komory a odběr plynného vzorků se provádí po definovaných časových intervalech (1., 3., 7., 14., 28., případně 56.) (ISO 16000-6, 2011). V závislosti na použitém sorbentu a na sloučeninách, u nichž se předpokládá, že budou shromažďovány na sorbentu, jsou zvoleny teploty termální desorpce v nástřikovém prostoru plynového chromatografu (Ewen *et al.*, 2004; Hyttinen *et al.*, 2010). Může se měnit rychlost průtoku a čas desorpce, ale vždy musí být zajištěn dostatečný přenos vzorku ze sorpčního zařízení do inletu GC a v průběhu také zamezeno ztrátám těkavých látek (Sivrikaya *et al.*, 2019). Důležitým komponentem pro chlazení vstupu GC a první části kolony je kryofokusace (kondenzace za působení nízké teploty) látek desorbovaných z odběrného zařízení při termální desorpci (Hübschmann, 2015). K chlazení se obvykle používá peltierův článek, tekutý CO₂ nebo dusík. Po skončení kryofokusace jsou těkavé látky uvedeny do plynného stavu, separovány a detekovány pomocí GC vybaveného různými detektory (Sivrikaya *et al.*, 2019; Makowski a Ohlmeyer, 2006).

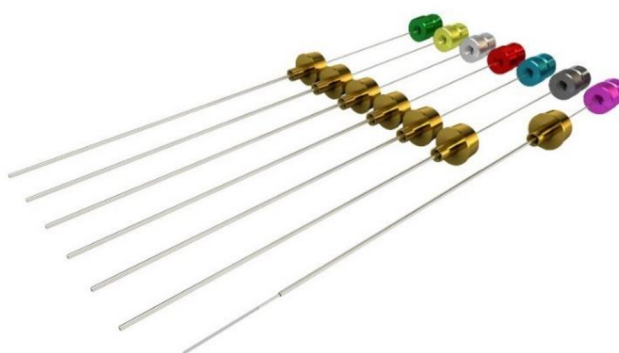
Nevýhodou postupu dle ISO 16000-6 (2011) je dlouhá časová prodleva do chvíle, kdy je vzorek v měřitelném stavu. Existují však různé úpravy normy ISO 16000-6, a to v podobě úpravy objemu zkušebních komor, v různých kombinacích sorbentu nebo doby přípravy vzorku nebo v odběru vzorků těkavých látek (**Tab. 5**). Přenosné jednotky v kombinaci s GC-MS umožňují téměř on-line měření emisí VOCs z materiálu in situ (Gross *et al.*, 2017, Nicolle *et al.*, 2008). Vzorky masivního dřeva mohou být rovněž podrobeny tepelné modifikaci přímo ve skleněné trubičce termálního desorbéru a vzniklé těkavé látky mohou být analyzovány pomocí GC-MS (Ewen *et al.*, 2004; Pérez-Coello *et al.*, 1997; Özel *et al.*, 2008).

Headspace

Odběr vzorků pomocí headspace (dále HS) je snadný způsob sběru VOCs, přičemž se použije definovaný objem vzduchu nad pevným vzorkem pro vstříkávání do GC-MS (např. vnitřní vzduch v prostorách s různým nábytkem, vzduch ze zkušební komory, vzduch ve vialce nad vzorkem apod.). Rovnováha mezi množstvím sloučenin přítomných v pevném materiálu a výpary sloučenin do HS prostoru je většinou ovlivněna (kromě samotné formy vzorku) teplotou. Zvýšení teploty lze využít ke zvýšení emisí VOCs, čímž se zvýší citlivost měření. Nicméně vzhledem k tomu, že se v postupu nepoužívá žádný koncentrační krok, je tento přístup méně citlivý než další níže popisované techniky odběru vzorků vzduchu. Oproti tomu nedochází k žádnému vlivu sorbentu na pozorované látky v souvislosti s jejich vyšší afinitou (Risholm-Sundman *et al.*, 1998; Hübschmann, 2015; Mirošová, 2012; Opekar, 2010).

SPME

Solid phase microextraction neboli mikroextrakce analytu na pevnou fázi (dále SPME) je citlivá, rychlá a bezextrakční technika (Hradecký, 2017) bez užití rozpouštědel vynalezená profesorem Pawliszynem na konci 80. let, která zahrnuje primárně prekoncentraci a následně zavedení vzorku (Souza-Silva a Pawliszyn, 2017). Jednotka SPME se skládá z křemičitého vlákna (**Obr. 4**) potaženého více či méně selektivní stacionární fází. Nejčastěji používanou komerčně dostupnou stacionární fází vlákna je adsorpční divinylbenzen/carboxen/polydimethylsiloxan (DVB/CAR/PDMS) pro širokou škálu polarit odebraných sloučenin nebo absorpční fáze; např. polydimethylsiloxan (PDMS) a polyakrylát (PA) pro nepolární a pro více polární sloučeniny (Cecchi, 2014; Ewen *et al.*, 2004; Bajer *et al.*, 2020; Wajs *et al.*, 2006, Liu *et al.*, 2012, Souza-Silva a Pawliszyn, 2017).



Obr. 4 SPME vlákna pro mikroextrakci na pevnou fázi (Shimadzu, 2022)

S výjimkou extrakce těkavých látek ze dřeva do vody nebo vody/etanolu simulujícího rozpouštědla se SPME při analýze těkavých látek ve dřevě obvykle provádí z headspace. Ve zmíněném případě může být přímé ponoření vlákna do kapaliny citlivější než sorpce z HS prostoru, protože dochází pouze k migraci mezi stacionární fází vlákna a těkavými látkami přítomnými v kapalině (Senila *et al.*, 2013). V případě použití HS

musí dojít k přestupu mezi tuhým/kapalným extraktem a vzduchem v oblasti HS a vláknem se stacionární fází v něm umístěným. Porovnáním SPME s jinými extrakčními metodami používanými pro analýzu vzorků dřeva bylo prokázáno, že tento přístup může být u vysoce těkavých sloučenin stejně citlivý jako destilace, přičemž vyžaduje méně materiálu k odběru vzorků a umožňuje automatizovanou analýzu velkého počtu vzorků. Použití tohoto přístupu u semivolatilních látek je omezeno (Cecchi, 2014; Wajs *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2012; Sutton *et al.*, 1997; Bouchonnet, 2013; Ligor *et al.*, 2008).

3.3.3 Zpracování dat, PCA a PLS-DA analýza

Analýza hlavních komponent (Principal Component Analysis – PCA) patří k základním metodám extrakce proměnných. Je často používaným nástrojem pro redukci počtu proměnných například před klasifikací dat, umožňuje však i vizualizaci vícerozměrných dat díky snížení počtu proměnných a v neposlední řadě slouží rovněž k odhalení skrytých (latentních) proměnných, které mohou napomoci interpretaci dat. PCA slouží pro vytvoření korelačních a statistických modelů. Výhodou PLS metody v porovnání s PCA analýzou je, že lépe umožňuje identifikovat významné proměnné. V oblasti porovnání výsledků emise VOCs jsou obě metody uplatňované (Ruiz-Perez *et al.*, 2020).

Výsledky PCA jsou zobrazeny pomocí dvou grafů. V rozptylovém grafu komponentních skóre (score plot) jsou vyobrazeny průměty jednotlivých vzorků do rovin zvolených základních komponent. Vzdálenosti mezi vzorky odrážejí podobnost mezi vzorky. Grafické znázornění vlivů (loading plot) indikuje, nakolik který signál v původním spektru přispívá k dané hlavní komponentě (dále PC). Signál vzdálenější od centra modelu se ve směru daného PC projevuje výrazněji. Protože směry v grafu komponentního skóre odpovídají směřům v loading plotu, lze seskupení spekter v grafu komponentního skóre interpretovat zkoumáním odpovídajících loadingů. Předností PCA je názorná vizualizace rozdělení dat a uživatelská jednoduchost. Její značná nevýhoda však spočívá v tom, že variabilita dat odpovědná za rozdíl mezi zkoumanými skupinami může být relativně malá a může zůstat překrytá variabilitou způsobenou jinými faktory, a tudíž se nepromítne do žádné z hlavních komponent. V takovém případě PCA neposkytne uspokojivé řešení problému (Pelantová, 2015).

Pro analýzu mnohorozměrných heterogenních souborů dat se využívá částečná diskriminační analýza nejmenších čtverců; Partial Least-Squares Discriminant Analysis (dále PLS-DA). V oblasti stanovení emise VOCs a definování vzájemných interakcí zkoumaných proměnných je často uplatňována. Tato metoda hledá lineární vztahy mezi vícerozměrnými sadami dat, což ve výsledku vede ke snížení dimenzionality dat, tj. k jejich zjednodušení. Výsledky PLS-DA modelu bývají opět znázorněny pomocí grafu komponentního skóre a jedno-, či dvourozměrného grafu vlivů (Ruiz-Perez *et al.*, 2020).

4 Materiál a použité přístroje

Pro experimentální šetření bylo použito 13 druhů dřeva (zvláště jádro a běl dubu) s ohledem na jeho širokou možnost využití v interiéru budov – zejména na konstrukční prvky, podlahové krytiny, obklady, ale také na interiérové vybavení. Byly testovány OSB desky jako zástupce konstrukčního panelu, konopné pazdeří s širokým potenciálem využití do zdiva i jako izolace a vybrané druhy konvenčních a alternativních materiálů aplikovatelných v oblasti dřevostaveb pro izolační účely vybrané na základě jejich tepelných vlastností a možné dostupnosti.

Uvedený text se věnuje rozboru vlastností konkrétních testovaných materiálů, počínaje jejich původem a přípravou vhodné frakce, resp. rozměru. Je zahrnuta stať o použitých chemických látkách, popsány technologické postupy realizovaných chemických a termálních modifikací vybraných materiálů a současně je popsána příprava a odběr samotných zkušebních vzorků s jejich rozměrovou, objemovou a hmotnostní specifikací. Je zahrnuta stručná charakteristika použitého přístrojového vybavení pracovišť Fakulty lesnické a dřevařské České zemědělské univerzity v Praze a dalších spřízněných pracovišť.

V návaznosti na přípravu vzorků byla prostřednictvím extrakce VOCs z jednotlivých materiálů a jejich stanovením pomocí plynové chromatografie s hmotnostně spektrometrickou detekcí získána data pro závěrečné porovnání. Tyto analytické kroky jsou dále popsány v kapitole 5.

4.1 Charakteristika materiálů, jejich modifikace a příprava zkušebních vzorků

4.1.1 Dřevo vybraných dřevin

Vybrané vzorky dřeva byly dodány Laboratoří pro zpracování dřeva a biomateriálů FLD, ČZU. Pro stanovení emise VOCs bylo zvoleno 5 druhů dřevin původních na území České republiky a 8 druhů dřevin introdukovaných nebo exotických. Dřeviny byly zvoleny na základě jejich potenciální využitelnosti v dřevěných konstrukcích a pro interiérové vybavení, viz **Tab. 6** (Kolář *et al.*, 2021; Patříčný, 2018; Hajar *et al.*, 2010; Ouinsavi *et al.*, 2005; Kamboj *et al.*, 2020; Kačíková *et al.*, 2021). Pro porovnání vlivu termální modifikace byly dřeviny testovány jak v neupraveném stavu, tak po cíleném vystavení vysokým teplotám. Proces termální modifikace je popsán níže.

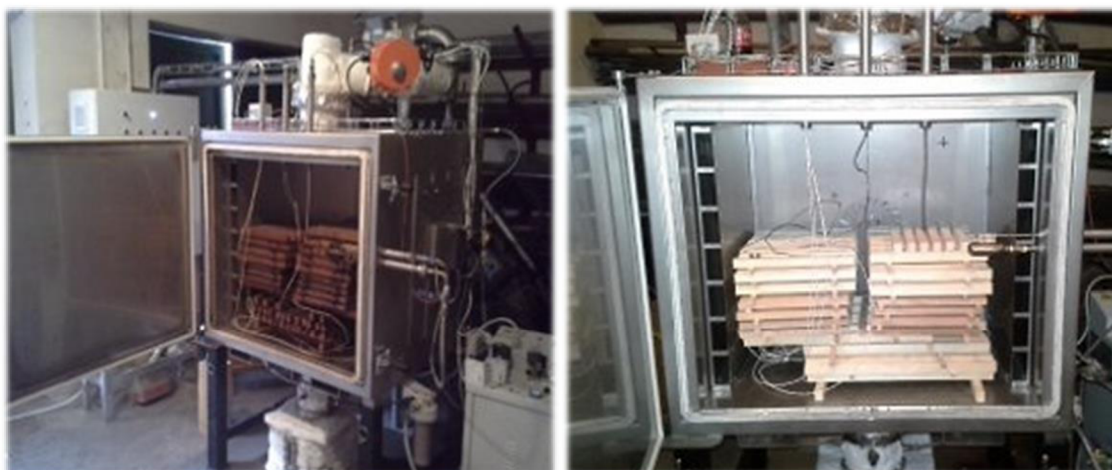
Termální modifikace dřeva

Zkušební tělesa o vlhkosti cca 8 % byla před termickou modifikací dosušena při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti, na konečnou vlhkost 0 % za použití laboratorní sušárny dřeva od značky Binder.

Tab. 6 Vybrané dřeviny; jejich využití v dřevěných konstrukcích a vnitřním prostředí budov

Původní dřeviny	Buk lesní <i>Fagus sylvatica</i>	Dub sp. <i>Quercus sp.</i>	Javor sp. <i>Acer sp.</i>	Modřín opadavý <i>Larix decidua</i>	Smrk ztepilý <i>Picea abies</i>			
možnost aplikace	<ul style="list-style-type: none"> • nábytek • lamely • překližka • předměty denní potřeby 	<ul style="list-style-type: none"> • nábytek • sudy • obklady • schody • podlahy • krovy 	<ul style="list-style-type: none"> • nábytek • dýhy • podlahy • hudební nástroje 	<ul style="list-style-type: none"> • nábytek • schody • obklady • střešní konstrukce • trámy 	<ul style="list-style-type: none"> • nábytek • obklady • střešní konstrukce • trámy • konstrukční panely 			
Nepůvodní dřeviny/exoty	Cedr libanonský <i>Cedrus libani</i>	Cedr španělský <i>Cedrela odorata</i>	Iroko <i>Chlorophora excelsa</i>	Meranti <i>Shorea sp.</i>	Merbau <i>Intsia Bijuga</i>	Padouk <i>Pterocarpus soyauxii</i>	Teak <i>Tectona grandis</i>	Trnovník akát <i>Robinia pseudoacacia</i>
možnost aplikace	<ul style="list-style-type: none"> • historické stavby a nábytek • éterické oleje • konzervanty 	<ul style="list-style-type: none"> • krabičky - humidory • dýhy • překližky • skříně na oděvy 	<ul style="list-style-type: none"> • nábytek • pracovní desky • obklady • parkety • schodiště • designová umyvadla • dveře • okna 	<ul style="list-style-type: none"> • vnitřní pohledové konstrukce • nábytek • podlahy • dýhy • lišty • okna 	<ul style="list-style-type: none"> • vnitřní konstrukce • nábytek • masivní podlahy 	<ul style="list-style-type: none"> • nábytek • podlahy • obklady • hudební nástroje 	<ul style="list-style-type: none"> • nábytek • dýhy • podlahy 	<ul style="list-style-type: none"> • dýha • nábytek • podlahy

Vzorky zkoumaného dřeva byly rozděleny do čtyř souborů. První soubor se skládal ze vzorků dřeva termicky neupraveného, tedy referenčního. Tyto vzorky bez termické úpravy byly klimatizovány na pokojovou teplotu 23 °C. Ostatní soubory byly postupně termicky modifikované v termokomoře (**Obr. 5**), kde byly vystaveny expozici při teplotách ($T = 180\text{ °C}, 200\text{ °C}, 220\text{ °C}$).



Obr. 5 Vzorky dřeva v termické komoře před a po termické modifikaci

Termální modifikace připravených vysušených těles probíhala v termokomoře značky Katres. Během procesu termování byly vzorky nejprve zahřáté na požadovanou teplotu, která byla následně držena po dobu 3 hodin, s navazujícím krokem postupného ochlazení komory.

Takto termicky upravené vzorky dřeva byly rozděleny podle teplot termování a posléze rozemlety na prášek. 0,5 g homogenizovaného zkušební vzorku bylo odváženo a uloženo do vialek pro následnou analýzu pomocí HS-SPME/GC-MS. Vliv termální modifikace na barevnou změnu dřeva zkoumaných dřevin zobrazuje **Tab. 7**.

Tab. 7 Vliv termální modifikace na barevné změny vybraných vzorků dřeva

	Bez termické úpravy 23 °C	Termo-úprava 180 °C	Termo-úprava 200 °C	Termo-úprava 220 °C
Buk lesní <i>Fagus sylvatica</i>				
Dub sp. <i>Quercus sp.</i>				
Javor sp. <i>Acer sp.</i>				
Modřín opadavý <i>Larix decidua</i>				
Smrk ztepilý <i>Picea abies</i>				
Cedr libanonský <i>Cedrus libani</i>				
Cedr španělský <i>Cedrela odorata</i>				
Iroko <i>Chlorophora excelsa</i>				
Meranti <i>Shorea sp.</i>				
Merbau <i>Intsia Bijuga</i>				
Padouk <i>Pterocarpus soyauxii</i>				
Teak <i>Tectona grandis</i>				
Trnovník akát <i>Robinia pseudoacacia</i>				

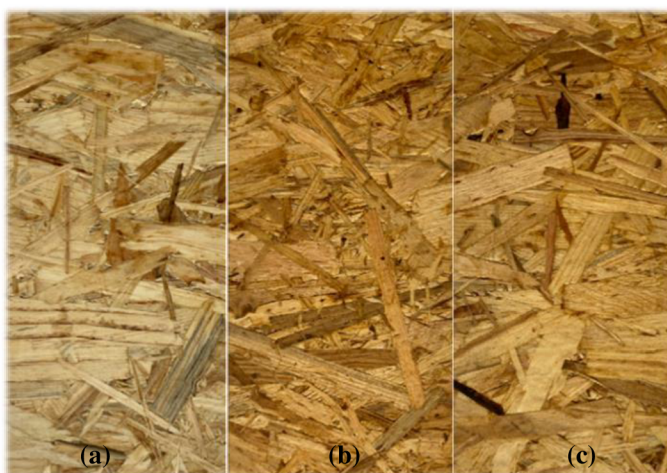
V návaznosti na provedený literární přehled a v součinnosti s realizovaným fakultním grantem TAČR byly – s cílem rozšířit experiment a porovnat variabilitu emise VOCs napříč kmenem stromu – zvláště testovány vzorky dřeva dubu rozdělené na jádro a běl. Homogenizované vzorky o hmotnosti 0,5 g byly uloženy do vialek pro následnou analýzu pomocí HS-SPME/GC-MS. Bylo testováno 6 vzorků bělového a 13 vzorků jádrového dřeva, jako referenční sloužil směsný vzorek.

4.1.2 OSB (Desky z orientovaných plochých třísek)

OSB pocházely od lokálního výrobce deskového materiálu. Deska pro odběr vzorků (v tloušťce 18 mm) byla neprodleně po zalisování zabalena do černé stretch folie (technologický krok „klimatizace“ byl vynechán kvůli zachování surového stavu desky) a převezena na místo realizace experimentálního šetření. Zde byla OSB neprodleně po převozu rozřezána a naformátována na rozměr zkušebních vzorků 150 x 300 mm vycházející z ČSN EN ISO 16000-11 (2007).

Modifikace povrchu OSB desek

Povrch vzorků OSB byl po naformátování modifikován třemi různými způsoby (**Obr. 6**). Aby byl imitován technologický krok lisování před postřikem 6 % roztokem kyseliny citronové a kyseliny vinné, byla deska nahřátá v laboratorních podmínkách v lisu. Souběžně bylo provedeno mechanické obroušení povrchu desky (**Tab. 8**). Jako referenční sloužil vzorek OSB bez povrchové úpravy. Boční plochy vzorků desek byly olepeny hliníkovou folií, aby bylo zabráněno nežádoucí emisi VOCs z hrany desky a poté uloženy do malých zkušebních komor – skleněných exsikátorů.



Obr. 6 Povrch vzorků OSB před uložením do exsikátorů (a) broušený povrch, (b) postřik kyselinou vinnou, (c) postřik kyselinou citronovou

Na základě zjištění z prostudované literatury se jako nejvýznamnější při redukci emise VOCs z materiálů jeví aplikace kyseliny citronové. Proto byl současně připraven vzorek (300 x 500 mm) modifikovaný 6% roztokem kyseliny citronové pro uložení do velké zkušební komory ve VVÚD v Březnici.

Tab. 8 Specifikace vzorků OSB pro analýzu emise VOCs

Uložení vzorku	Modifikace	Specifikace
<i>Exsikátor 1</i>	bez modifikace	-
<i>Exsikátor 2</i>	zbroušení povrchu pásovou brusku	brusný papír zrnitosti 200
<i>Exsikátor 3</i>	postřik povrchu kyselinou citronovou	6% roztok C ₆ H ₈ O ₇
<i>Exsikátor 4</i>	postřik povrchu kyselinou vinnou	6% roztok C ₄ H ₆ O ₆
<i>Zkušební komora</i>	postřik povrchu kyselinou citronovou	6% roztok C ₆ H ₈ O ₇

4.1.3 Konopné pazdeří

Konopné pazdeří pro realizovaná výzkumná šetření bylo dodáno od lokálního distributora se specializací na trvale udržitelné stavební materiály. Jednalo se o průmyslové konopí pěstované ve Velké Británii a zpracované výhradně pro společnost Lhoist UK, která ho využívá pro stavební účely. Poněvadž bylo konopí dodáno v surovém stavu určeném k použití pro stavební účely, byla při dodatečném laboratorním zpracování odstraněna vlákna a další frakčně nevhodné části rostliny. Velikost jednotlivých částic pazdeří se lišila mezi $(4-10) \times (2-5) \times 3$ mm (délka \times šířka \times tloušťka). Dva měsíce před zahájením experimentu byly všechny vzorky uloženy v laboratoři v nádobách s minimálním headspace prostorem.

Chemická modifikace konopného pazdeří

Konopné pazdeří bylo analyzováno jak v surovém stavu bez modifikace, tak po jeho chemické modifikaci s vizí dalšího snížení emisí VOCs. Vzorky pazdeří byly rozděleny do čtyř souborů. První soubor byl tvořen vzorky konopného pazdeří bez úpravy. Tyto vzorky byly vysušeny a poté naváženy do vialek ($m_{\text{zkušební vzorku}} = 0,5$ g). Další tři soubory prošly chemickou modifikací smáčením ve vybraných vodných roztocích. Byly aplikovány kyselina citronová a kyselina vinná ve formě kyselých vodných roztoků a hydrogenuhličitan sodný ve formě zásaditého vodného roztoku. Aby nedošlo k narušení mechanických vlastností pazdeří, byly zvoleny nízké chemické koncentrace aplikované při pokojové teplotě. Kyselina citronová, kyselina vinná a hydrogenuhličitan sodný byly rozpuštěny na 6% roztok (**Tab. 9**). Do skleněných kádinek o objemu 0,5 l bylo přidáno suché konopné pazdeří a stlačeno pomocí menší kádinky pod úroveň hladiny roztoku. Po 24 hodinách působení bylo modifikované konopné pazdeří vysušeno přes noc v cirkulační sušárně při 40 °C na konstantní obsah vody (10 %) a analytický vzorek umístěn do otevřených vialek s headspace (každá vialka obsahovala 0,5 g zkušební vzorku) – **Obr. 7**.

Tab. 9 Chemicky modifikované konopné pazdeří

Zkušební materiál	K _A	K _B	K _C
Chemická látka	<i>Kyselina vinná</i>	<i>Kyselina citronová</i>	<i>Hydrogenuhličitan sodný</i>
Koncentrace roztoku (hm. %)	6	6	6
Způsob chemické modifikace	máčení 24 hod	máčení 24 hod	máčení 24 hod

Pozn.: K_A – konopí po aplikaci kyseliny vinné, K_B – konopí po aplikaci kyseliny citronové, K_C – konopí po aplikaci hydrogenuhličitanu sodného)

Vedle surového a chemicky modifikovaného konopného pazdeří sloužily jako referenční smrkové třísky. Pro porovnání vlastností – s ohledem na provázanost vstupních podmínek – pocházely analyzované třísky dřeva smrku od identického lokálního výrobce jako OSB. Před zpracováním byly surové smrkové klády skladovány přirozeně na povětrnosti ve venkovním prostředí v místě výroby dodavatele. V prvním kroku byly klády odkorněny a jednostupňovým způsobem roztrískovány. Třísky byly posléze vysušeny na 3 % obsah vlhkosti a před nanesením lepicí směsi a aditiv byly v areálu

výrobce odebrány jejich vzorky. Velikost smrkových třísek byla upravena v laboratorních podmínkách na $(3-10) \times 2 \times 1$ mm (délka \times šířka \times tloušťka). Dva měsíce před zahájením experimentu byly všechny vzorky uloženy v laboratoři v nádobách s minimálním headspace prostorem.

Zkušební vzorky smrkových třísek o hmotnosti 0,5 g byly umístěny do vialek bez předchozí chemické úpravy. Všechny vzorky vložené do otevřených vialek byly skladovány v uzavřených skleněných exsikátorech (objem 24 l) napojených na přívod suchého a přečištěného vzduchu s konstantním průtokem $0,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ při $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento přístup umožnil řízenou výměnu vzduchu, zatímco mohla být kontinuálně pozorována degradace materiálu a kolísavost emisí VOCs.



Obr. 7 Vzorky v uzavřených vialkách určené k analýze pomocí HS-SPME/GC-MS – změna barvy: S – smrkové třísky, K – konopí bez chemické modifikace, K_A – konopí a kyselina vinná, K_B – konopí a kyselina citronová, K_C – konopí a hydrogenuhličitan sodný

4.1.4 Řepková řezanka

Řepkové stonky byly dodány od lokálního pěstitele a zpracovatele ihned po sklizení. Stonky byly rozdrceny v kladívkovém šrotovníku na jemnou frakci 0–8 mm.

4.1.5 Rákos totora

Stonky rákosu totora a panel z vláken rákosu byly dodány prostřednictvím mezinárodní univerzitní spolupráce přímo z lokálních zdrojů z Ekvádoru. Stonky byly rozdrceny v kladívkovém šrotovníku na jemnou frakci 0-8 mm.

4.1.6 Dřevní štěpka

Dřevní štěpka představuje blíže nespecifikovaný směsný odpadní dřevní materiál o základním rozměru $20 \times 20 \times (2-4)$ mm (délka \times šířka \times tloušťka) bez kovových příměsí. Tento materiál byl dále nadrcen na jemnější frakci tvaru třísek. Dva měsíce před zahájením experimentu byly vzorky uloženy v laboratoři ve vzduchotěsných nádobách s minimálním headspace prostorem.

4.1.7 Komerčně získané vzorky

Tyto vzorky byly získány a emise těkavých látek z nich byla proměřena pro porovnání se vzorky používanými v jiných studiích v rámci FLD. Údaje o datu a místě výroby u těchto materiálů nebyly zvláště sledovány. Jedná se o materiály s různou dobou klimatizace.

4.1.7.1 Polystyren

Vzorek extrudovaného a expandovaného polystyrenu byl nakoupen ve formě panelu od lokálního dodavatele izolačních materiálů. Výrobce deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti testovaných materiálů je 0,030-0,038 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ v případě extrudovaného a 0,040 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ v případě expandovaného polystyrenu.

4.1.7.2 Minerální vlna

Kamenná vlna a skelná vata, jakožto konvenční izolační materiály byly nakoupena u výrobce Isover, ČR ve formě panelů a v roli. Výrobce deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti testovaných materiálů je v rozmezí 0,030-0,045 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

4.1.7.3 Polyuretanová pěna

Vzorek PUR panelu byl nakoupen od lokálního dodavatele izolačních materiálů. Dle Pavelka (2019) byla naměřená hodnota součinitele tepelné vodivosti PUR panelu 0,0254 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

4.1.7.4 Měkká dřevovláknitá deska

Vzorek měkké dřevovláknité desky protect dry od firmy Steico má deklarovaný součinitel tepelné vodivosti 0,037 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

4.1.7.5 Kaučuková izolace

Izolační pásy ze syntetického kaučuku jsou určeny pro vnější i vnitřní aplikace. Jedná se o komplexní elastomerní kaučukový izolační systém spojený s vícevrstvou povrchovou úpravou odolnou proti ultrafialovému záření a povětrnostním vlivům. Materiál byl zakoupen přímo u výrobce. Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti testovaného materiálu je 0,033 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ při použité tloušťce materiálu 20 mm.

4.2 Použité chemické látky

Kyselina vinná ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$), kyselina citronová – monohydrát ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\cdot\text{H}_2\text{O}$) a hydrogenuhličitan sodný (NaHCO_3) byly zakoupeny od společnosti Lach-ner (Neratovice, Česká republika). Krystalická forma všech chemikálií byla dále rozpuštěna v destilované vodě (Millipore-Elix,-Simplicity) za účelem přípravy vodného roztoku o specifické koncentraci (**Tab. 8, 9**).

4.3 Laboratorní vybavení

4.3.1 Vybavení pro přípravu a klimatizaci vzorků

Na základě principu simulované komorové zkoušky podle ISO 16000-6 (2011) sloužily jako komora pro pobyt vzorků desek i sypkého materiálu uloženého ve vialkách (objem 10 a 20 ml) (**Obr. 8**) skleněné exsikátory Novus DURAN 300 o objemu 18,4 litrů.



Obr. 8 Vialka o objemu 20 ml pro uložení analytického vzorku před testováním pomocí HS-SPME

Exsikátory byly dále použity také pro odběr vzorků VOCs nasyceného vzduchu. Spodní část exsikátorů disponuje bočním hrdlem pro umístění regulačního ventilu, víko exsikátoru má zábrusový kohout (**Obr. 9**). Exsikátory byly napojeny na proplachování čistým vzduchem. Vzduch byl čerpán z centrálního rozvodu stlačeného vzduchu a na vstupu do exsikátorů přečištěn pomocí filtru s aktivním uhlím a filtru velmi jemných částic.



Obr. 9 Skleněná zkušební komora – exsikátor Novus DURAN 300

Dílčí část experimentu byla realizována ve Výzkumném a vývojovém ústavu dřevařském (dále VVÚD) standardizovaným postupem při uložení vzorku do velkoobjemové zkušební komory o objemu 1 m³ dle ČSN EN ISO 16000-9 (2007) s následným odběrem analytu. Parametry zkušební komory jsou součástí Protokolu o zkoušce – **Příloha č. 3**.


4.3.2 Přístrojové vybavení

4.3.2.1 Plynový chromatograf s kvadrupól hmotnostním spektrometrem Shimadzu

Pro základní analýzy byl použit GC-MS s kvadrupól hmotnostním detektorem QP 2010 SE – Ultra (Shimadzu, Kyoto, Japonsko) v hybridním provedení s autosamplerem AOC 5000 plus, který umožňuje automatizovanou manipulaci se sorpčními trubičkami pro termální desorpci. Základní parametry jsou shrnuty v **Tab. 10**.

Tab. 10 Základní parametry přístroje Shimadzu QP 2010 SE – Ultra

GC-MS: Shimadzu QP 2010 SE – Ultra	
AS: Optic AOC 5000 plus	
GC	
Nosný plyn	helium
MS kvadrupól	
Hmotnostní rozsah	30 – 400 m/z
Rychlost scanování	variabilní
Teplota zdroje	250 °C
Ionizační energie	70 eV
Měřená veličina	Látkové množství, profil látek
Způsob a frekvence kalibrace	Leak check, MSD tuning dle potřeby
Způsob a frekvence confirmace	Leak check a peak monitoring (PFTBA), před každým metrologickým výkonem, po každé opravě




4.3.2.2 Plynový chromatograf s TOF hmotnostním spektrometrem LECO

U vybraných vzorků byla analýza realizována pomocí GC-MS s time of flight (TOF) hmotnostním analyzátozem Pegasus 4D (LECO, St. Joseph, MI, USA). Základní parametry jsou shrnuty v **Tab. 11**.

Tab. 11 Základní parametry přístroje LECO Pegasus 4D

GC-MS: LECO Pegasus 4D	
AS: Gestrel MPS2	
GC	
Nosný plyn	helium
MS TOF	
Hmotnostní rozsah	15 – 500 m/z
Rychlost sběru plných spekter	1-500 Hz
Teplota zdroje	250 °C
Ionizační energie	70 eV
Měřená veličina	Látkové množství, profil látek
Způsob a frekvence kalibrace	Leak check, MSD tuning dle potřeby
Způsob a frekvence confirmace	Leak check a peak monitoring (PFTBA), před každým metrologickým výkonem, po každé opravě



5 Metodika

Experimentální část výzkumu byla realizována na základě definovaných cílů na pracovištích Fakulty lesnické a dřevařské České zemědělské univerzity v Praze.

V rámci dosažení cílů práce byly sledovány charakteristiky jednotlivých materiálů prostřednictvím analýzy emise VOCs pro porovnání potenciální škodlivosti uvedených materiálů při jejich aplikaci ve stavebních konstrukcích – zejména se zaměřením na dřevostavby, ale také při jejich použití v interiéru budov, a to především s ohledem na zdravotní nezávadnost vnitřního prostředí. V návaznosti na přímou spolupráci na souběžně probíhajícím výzkumu v oblasti tepelných vlastností materiálů byl u vybraných materiálů sledován také součinitel tepelné vodivosti u ostatních materiálů byly pro finální porovnání použity tabulkové hodnoty.

Přehled okruhů experimentálních stanovení:

- I. OSB (chemická modifikace, mechanická úprava)
- II. Konopné pazdeří a smrkové třísky (chemická modifikace)
- III. Izolační materiály – měkká dřevovláknitá deska, minerální vlna (skelná vata, kamenná vlna), polystyren (extrudovaný, expandovaný), PUR pěna, kaučuková izolace, řepková řezanka, dřevní štěpka, rákos totora (stonek bez modifikace a ve formě desky)
- IV. Vybrané druhy dřeva (jádro/běl a termální modifikace)

5.1 Extrakce VOCs a jejich stanovení pomocí plynové chromatografie s hmotnostně spektrometrickou detekcí

Plošný materiál (OSB) byl analyzován jak prostřednictvím standardizované zkoušky dle ČSN EN ISO 16000-9 (2007), tak pomocí modifikované zkoušky za použití malé komory v podobě exsikátoru s následnou sorpcí na adsorbent Tenax TA[®] umístěný ve skleněných trubičkách. Pro separaci a identifikaci těkavých organických sloučenin byla použita plynová chromatografie-hmotnostní spektrometrie (GC-MS) s různými typy detektorů.

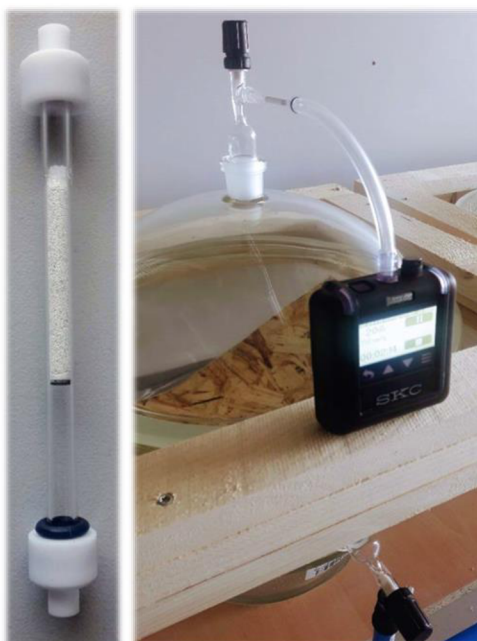
Vzorky sypkých a vláknitých materiálů byly uloženy do skleněných vialek o objemu 20 ml. Tyto vzorky byly analyzovány pomocí rychlých provozních zkoušek pomocí odběru analytu z headspace na SPME vlákno.

5.1.1 Stanovení VOCs emitovaných z OSB

V první fázi experimentu byly analyzovány OSB. Vzorky desek byly volně loženy v exsikátorech. Spodní nádoba exsikátoru a víko byly pro zabránění nežádoucímu úniku nasyceného vzduchu pevně spojeny dřevěným rámem. Exsikátory byly napojeny

na přívod přečištěného vzduchu. Zábrusový kohout ve víku pak sloužil k odvodu vzduchu nasyceného VOCs.

Odběr vzorků vzduchu byl realizován 3., 7., 14. a 28. den od výroby a od uložení zkušebních vzorků do exsikátorů. Exsikátor se zkušebním vzorkem desky byl promýván vzduchem (průtok $1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) vždy 1 celou hodinu před odběrem vzorku nasyceného vzduchu. Poté byl průtok čistého vzduchu uzavřen a vzorek nasyceného vzduchu byl pomocí mobilního odběrového čerpadla SKC – tzv. kapesní pumpy – nasorbován na sorbent Tenax TA[®] umístěný ve skleněné trubičce. Bylo odebráno vždy 0,05 l vzduchu při průtoku $20 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. Toto množství při daném poměru objemu desky a objemu exsikátoru odpovídá přibližně 2 l odebraného vzorku vzduchu ze zkušební komory VVÚD dle standardizované metody ČSN EN ISO 16000-9 (2007) pro stanovení emisí těkavých organických látek ze stavebních materiálů a nábytku metodou zkušební komory. Uložení vzorku a sorpci na trubičku s Tenaxem zachycuje **Obr. 10**.



Obr. 10 Trubička se sorbentem Tenax TA[®] pro termální desorpci a odběr vzorku vzduchu pomocí mobilního odběrového čerpadla

Měření v případě OSB byla provedena pomocí Quadrupole Shimadzu GC-MS QP2010 SE-Ultra s použitím kapilární kolony DB (15 m, 0,25 mm i.d., 0,25 μm tloušťka filmu) od společnosti Supelco. Nástřik byl realizován při teplotě 200 °C, zatímco teplota transfer line zůstala na 280 °C. Teplotní program byl následující: 50 °C po dobu 1 min a poté následoval teplotní gradient $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ až k 210 °C a $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ až k 330 °C při následném zadržení teploty po dobu 17 min. Celková doba běhu analýzy byla 37 min. Jako nosný plyn bylo použito helium o objemové rychlosti $1 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$.

Skupina cílových sloučenin vycházela z prostudované literatury. Nicméně, aby pozorování nebylo cíleno pouze na několik vybraných sloučenin, byl hmotnostní analyzátor spuštěn v režimu SCAN (rychlost skenování 1400 ns, rozsah 40-450 m/z).

Identifikace chemických sloučenin byla založena na podobnosti hmotnostních spekter s vestavěnou knihovnou NIST MS (NIST, Gaithersburg, MD, USA; 2017 vydaná verze). Parametry stanovení² ukazuje **Tab. 12**.

Tab. 12 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z OSB – kvadrupól

Použitý analytický systém	
<i>Shimadzu QP2010 SE – Ultra</i>	
Vzorkování	
Technika	Desorpce Tenax TA [®]
Teplota (°C)	80
Doba inkubace (min)	10
Doba sorpce (min)	10
GC – plynová chromatografie	
Nástřík	Termální desorpce, split 10, poč. teplota 50 °C, gradient 60 °C.s ⁻¹ do 200°C
Kolona	DB-WAX (15 m, 0,25 mm i.d., 0,25 µm tloušťka filmu
Teplotní program pece	50 °C (1 min), 10 °C.min ⁻¹ do 210 °C a 20 °C.min ⁻¹ do 330 °C
Nosný plyn	Helium
Rychlost průtoku	1 ml.min ⁻¹
Teplota transferline	280 °C
MS – hmotnostní spektrometrie	
Ionizace	Electron Impact (ionizační energie -70 eV)
Hmotnostní rozsah	40–450 m/z
Solvent delay	60 s
Scanovací rychlost	1400
Iontový zdroj – teplota	200 °C

² Vhodné nastavení parametrů stanovení vycházelo z několikaměsíčního procesu vývoje metody – testování a ověřování. Nastavení bylo primárně založeno na podkladech a doporučeních uvedených v ISO 16000-6 (2011) a bylo dále přizpůsobeno specifikům přístroje Shimadzu QP2010 SE – Ultra.

5.1.2 Stanovení VOCs z konopného pazdeří a smrkových třísek

V druhé fázi experimentu byly analyzovány vzorky ošetřeného i neošetřeného konopného pazdeří a smrkových třísek. Vzorky materiálu byly umístěny ve vialkách a ty byly uloženy odděleně do exsikátorů. Analýza emise VOCs byla realizována 1., 3., 7. a 14. den pomocí GC-MS. Aby se předešlo případným rozdílnostem v citlivosti přístroje v důsledku nutného časového odstupu a rozdílnosti vstupních podmínek, byly všechny vzorky měřeny v jedné sekvenci. Před analýzou byly vzorky skladovány ve vzduchotěsně uzavřených vialkách a hluboce zmrazené (-80 °C).

Pro odběr VOCs byla použita mikroextrakce na pevnou fázi vlákna (SPME) s divinylbenzen/karboxen/polydimethylsiloxan filmem (DVB/CAR/PDMS 50/30 µm) od firmy Supelco (Bellefonte, PA, USA). Lahvičky byly inkubovány po dobu 10 minut, aby se zvýšila emise těkavých látek ze vzorku, a pak se těkavé látky shromažďovaly na stacionární fázi vlákna po dobu dalších 10 minut; oba kroky byly realizovány při 100 °C.

Základní měření byla v případě konopného pazdeří a smrkových třísek provedena pomocí Quadrupole Shimadzu GC-MS QP2010 SE-Ultra s použitím kapilární kolony SLB-5MS (30 m, 0,25 mm i.d., 0,25 µm tloušťka filmu) od společnosti Supelco. Nástřík byl realizován při teplotě 250 °C, zatímco teplota transfer line zůstala na 250 °C. Teplotní program byl následující: 40 °C po dobu 1 min a poté následoval teplotní gradient 5 °C.min⁻¹ až k 250 °C při následném zadržení teploty po dobu 2 min. Celková doba běhu analýzy byla 45 min. Jako nosný plyn bylo použito helium o objemové rychlosti 1 ml.min⁻¹. Parametry stanovení ukazuje **Tab. 13**.

Tab. 13 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z konopného pazdeří – kvadrupól

Použitý analytický systém	
<i>Shimadzu QP2010 SE – Ultra</i>	
Vzorkování	
Technika	SPME
Teplota (°C)	100
Doba inkubace (min)	10
Doba sorpce (min)	10
GC – plynová chromatografie	
Nástřík	Termální desorpce, splitless, poč. teplota 50 °C, gradient 60 °C.s ⁻¹ do 200°C
kolona	SLB-5MS (30 m, 0,25 mm i.d., 0,25 µm)
Teplotní program ID pece	40 °C (1 min), 5 °C.min ⁻¹ do 250 °C (1 min)
Nosný plyn	Helium
Rychlost průtoku	1,5 ml.min ⁻¹
Teplota transferline	250 °C

MS – hmotnostní spektrometrie	
Ionizace	Electron Impact (ionizační energie -70 eV)
Hmotnostní rozsah	30–400 m/z
Solvent delay	120 s
Scanovací rychlost	2000
Iontový zdroj – teplota	200 °C

U vybraných vzorků konopného pazdeří a smrkových třísek byla analyzována stejná sada pomocí GC-MS s time of flight (TOF) hmotnostním analyzátozem Pegasus. Cílem bylo získat úplná spektrální data pro budoucí chemometrické vyhodnocení. Postup odběru vzorků zůstal stejný, nicméně pro separaci v GC byl použit rychlejší gradient teploty. Teplotní program pece GC byl následující: vyhřívání při 40 °C po dobu 1 min; poté navýšení teploty po 10 °C.min⁻¹ až k 70 °C; následně růst teploty po 5 °C.min⁻¹ až k 200 °C a při 20 °C.min⁻¹ až do 280 °C při (hold time 1 min). Celkový čas analýzy GC byl 21 min. Parametry stanovení ukazuje **Tab. 14**.

Tab. 14 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z konopného pazdeří – TOF

Použitý analytický systém	
<i>Leco Pegasus 4D</i>	
Vzorkování	
Technika	SPME
Teplota (°C)	100
Doba inkubace (min)	10
Doba sorpce (min)	10
GC – plynová chromatografie	
Nástřík	Cold Splitless (do 20 °C) vyhřáto grad 8 do 250°C
1D kolona	RXI-5 (30 m, 0,25 mm i.d., 0,25 µm)
Teplotní program 1D pece	40 °C (1 min), 10 °C.min ⁻¹ do 70 °C, 10 °C.min ⁻¹ do 200 °C a 20 °C.min ⁻¹ do 280 °C (1 min)
Nosný plyn	Helium
Rychlost průtoku	1 ml.min ⁻¹
Teplota transferline	280 °C
MS – hmotnostní spektrometrie	
Ionizace	Electron Impact (-70 eV)
Hmotnostní rozsah	35–450 m/z
Solvent delay	480 s
Akviziční rychlost	10 (Hz)
Iontový zdroj – teplota	250 °C

Skupina cílových sloučenin vycházela z prostudované literatury. Nicméně, aby bylo zachyceno širší portfolio látek, nebyl použit citlivější režim SIM (selected ion monitoring), ale SCAN (rychlost skenování 2000 ns, rozsah 30-400 m/z), který výměnou

za sníženou citlivost zachytí informaci o všech hmotách v daném rozsahu. Na rozdíl od jinde v práci použitého TOF analyzátoru však neshromačňuje plná spektra s danou frekvencí, ale pouze vždy danou hmotu v určitý čas. Prakticky zde bylo pomocí TOF zachyceno plné spektrum hmot od 35-450, 10x za vteřinu. Kvadrupól při scanu sbíral hmoty v daném rozsahu postupně, na scan jedné hmoty měl 5,4 ns (scanovací rychlost/rozsah hmot). Jednu hmotu z hmotnostního spektra, např. charakteristický ion pro terpenické látky $m/z = 93$. Takto výrazně horší sběr dat limituje použití kvadrupólů v necílovém stanovení. Identifikace chemických sloučenin byla založena na podobnosti hmotnostních spekter s vestavěnou knihovnou NIST MS (NIST, Gaithersburg, MD, USA; 2017 vydaná verze). Pro potvrzení identity cílových sloučenin byly použity retenční časy příslušných standardů (Sigma-Aldrich; Německo).

Skupina přibližně patnácti cílových VOCs byla vybrána na základě dostupné literatury. Pro kvantitativní vyjádření přítomnosti látky ve vzorcích byla použita integrace křivky chromatogramu v daném retenčním čase pro vybranou selektivní hmotu hmotnostního spektra dané látky.

5.1.3 Stanovení VOCs z izolačních materiálů

Ve třetím kroku byly z hlediska emise těkavých látek analyzovány materiály, používané nebo potenciálně aplikovatelné jako tepelná izolace. U některých z vybraných materiálů byly v návaznosti na další fakultní výzkum současně testovány také jejich tepelné vlastnosti.

Do této skupiny pokusů patří vzorky alternativních biologických materiálů (**Obr. 11**):

- konopné pazdeří,
- dřevní štěpka z recyklátu,
- rákos totora (stonek a vláknitá deska),
- řepková řezanka



Obr. 11 Vzorky v uzavřených vialkách určené k analýze pomocí HS-SPME/GC-MS: (a) konopné pazdeří (ref.), (b) roztřískovaná dřevní štěpka, (c) deska z rákosu totora, (d) řepková řezanka

a průmyslově vyráběné izolace (**Obr. 12**):

- měkká dřevovláknitá deska,
- minerální vlna (skelná vata, kamenná vlna),
- polystyren (expandovaný, extrudovaný),
- PUR pěna,
- kaučuková izolace.



Obr. 12 Vzorky v uzavřených vialkách určené k analýze pomocí HS-SPME/GC-MS: (a) měkká dřevovláknitá deska, (b) skelná vata, (c) minerální vlna, (d) expandovaný polystyren, (e) extrudovaný polystyren, (f) PUR pěna, (g) kaučuková izolace

Aby se předešlo případným rozdílnostem v citlivosti přístroje v důsledku časového odstupu a rozdílnosti vstupních podmínek, byly tyto vzorky měřeny opět v jedné sekvenci.

Pro odběr VOCs byla použita mikroextrakce na pevnou fázi vlákna s divinylbenzen/karboxen/polydimethylsiloxan filmem (DVB/CAR/PDMS 50/30 μm) od firmy Supelco (Bellefonte, PA, USA). Vialky byly inkubovány po dobu 10 minut, aby byla aktivována emise těkavých látek ze vzorku, a poté byly těkavé látky sorbovány po dobu následujících 10 minut na pevnou fázi, obě při teplotě 60 °C.

Měření byla provedena pomocí Leco Pegasus (TOF) s použitím kapilární kolony Rxi-5ms (30 m, 0,25 mm i.d., 0,25 μm tloušťkou filmu) od společnosti Supelco. Nástřík byl realizován při teplotě 275 °C, zatímco teplota transfer line zůstala na 280 °C. Teplotní program byl následující: 60 °C po dobu 1 min a poté následoval teplotní gradient 10 °C.min⁻¹ až k 210 °C následovaný teplotním gradientem 20 °C.min⁻¹ až k 330 °C. Jako nosný plyn bylo použito helium o objemové rychlosti 1 ml.min⁻¹. Parametry stanovení ukazuje **Tab. 15**.

Tab. 15 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z izolačních materiálů – TOF

Použitý analytický systém	
<i>Leco Pegasus 4D</i>	
Vzorkování	
Technika	SPME
Teplota (°C)	60
Doba inkubace (min)	10
Doba sorpce (min)	10
GC – plynová chromatografie	
Nástřík	Hot Splitless (275°C)
1D kolona	Rxi-5ms (30 m, 0,25 mm ID, 0,25 μm tloušťka filmu stacionární fáze)
Teplotní program 1D pece	60 °C (1 min), 10 °C.min ⁻¹ do 210 °C a 20 °C.min ⁻¹ do 330 °C
Nosný plyn	Helium
Rychlost průtoku	1 ml.min ⁻¹
Teplota transferline	280 °C
MS – hmotnostní spektrometrie	
Ionizace	Electron Impact (-70 eV)
Hmotnostní rozsah	35–500 m/z
Solvent delay	480 s
Akviziční rychlost (Hz)	10
Iontový zdroj – teplota	250 °C

Skupina cílových sloučenin vycházela opět z prostudované literatury. Identifikace chemických sloučenin byla založena na podobnosti hmotnostních spekter s vestavěnou knihovnou NIST MS (NIST, Gaithersburg, MD, USA; 2017 vydaná verze).

5.1.4 Stanovení VOCs emitovaných ze dřeva

Čtvrtá fáze experimentu byla koncentrována na vzorky dřeva. Dílčí experiment byl cílen na dřevo dubu bez další úpravy. Zvláště byly testovány vzorky bělí a jádra pro ověření jejich vlastností a vhodnosti použití v interiéru budov. Další obsáhlá dílčí část byla cílena na dřevo po termální úpravě.

5.1.4.1 Stanovení emise VOCs z bělového a jádrového dřeva dubu

Pro porovnání emise těkavých látek jádra a bělí dubu byla zvolena technika mikroextrakce na tuhou fázi, spojená s kompletní dvourozměrnou plynovou chromatografií a průletovou hmotnostně spektrometrickou detekcí (GC×GC-TOF-MS).

Vždy 0,25 g homogenizovaného vzorku bylo naváženo do vialek pro HS analýzy. VOCs byly uvolňovány při zahřívání vzorku (80 °C) pomocí automatizovaného systému a sorbovány na SPME vlákno. Separované látky byly detekovány pomocí průletového hmotnostního spektrometru (TOF). Parametry stanovení prezentuje **Tab. 16**.

Tab. 16 Parametry analýzy pro stanovení VOCs z jádra/bělí dubu – TOF

Použitý analytický systém	
<i>Leco Pegasus 4D</i>	
Vzorkování	
Technika	SPME
Teplota (°C)	80
Doba inkubace (min)	10
Doba sorpce (min)	10
GC – plynová chromatografie	
Nástřík	Hot Splitless (275°C)
1D kolona	Rxi-5ms (30 m, 0,25 mm ID, 0,25 um tloušťka filmu stacionární fáze)
Teplotní program 1D pece	60 °C (1 min), 10 °C/min do 210 °C a 20 °C/min do 330 °C
Nosný plyn	Helium
Rychlost průtoku	1 ml.min ⁻¹
Teplota transferline	280 °C
MS – hmotnostní spektrometrie	
Ionizace	Electron Impact (-70 eV)
Hmotnostní rozsah	35–500 m/z
Solvent delay	480 s
Akviziční rychlost (Hz)	10
Iontový zdroj – teplota	250 °C

5.1.4.2 Stanovení emise VOCs termálně modifikovaného dřeva

Pro změření a následné vyhodnocení vlivu jednotlivých úprav dřeva na emisi těkavých látek byla zvolena opět technika mikroextrakce na tuhou fázi, spojená

s kompletní dvourozměrnou plynovou chromatografií a průletovou hmotnostně spektrometrickou detekcí (GC×GC-TOF-MS).

Obdobně bylo naváženo 0,25 g homogenizovaného vzorku. Parametry stanovení zobrazuje tabulka **Tab. 17**.

Tab. 17 Parametry analýzy pro stanovení VOCs ze dřeva – TOF

Použitý analytický systém	
<i>Leco Pegasus 4D</i>	
Vzorkování	
Technika	SPME
Teplota (°C)	80
Doba inkubace (min)	10
Doba sorpce (min)	10
GC – plynová chromatografie	
Nástřík	Hot Splitless (275°C)
1D kolona	Rxi-5ms (30 m, 0,25 mm ID, 0,25 um tloušťka filmu stacionární fáze)
Teplotní program 1D pece	40 °C (1 min), 10 °C/min do 280 °C a 20 °C/min do 300 °C (celkem 28min)
2D kolona	BPX-50 (1,5m, 0,1mm ID, 0,1um tloušťka filmu stacionární fáze)
Nosný plyn	Helium
Rychlost průtoku	1 ml.min ⁻¹
Teplota transferline	280 °C
MS – hmotnostní spektrometrie	
Ionizace	Electron Impact (-70 eV)
Hmotnostní rozsah	29–500 m/z
Solvent delay	180 s
Akviziční rychlost (Hz)	100
Iontový zdroj – teplota	250 °C

5.2 Zpracování dat

Naměřená data byla zpracována pomocí přístrojových SW příslušných k použitému měřidlu. V datech z přístroje Shimadzu byly automaticky vyhledány signály s S/N větším než stanovený limit a dle hmotnostních spekter byla SW navržena identita látky. Pro další zpracování dat byly exportovány plochy signálů – integrál pod křivkou TIC (Total Ion Current). Následné zpracování dat probíhalo v běžném SW – MS Excel.

Pro zpracování dat naměřených na přístroji Pegasus 4D se použil přístrojový software ChromaTOF (LECO, USA). Byly využity zejména algoritmy automatického vyhledání píků a hmotnostně spektrometrické dekonvoluce, která u nalezených signálů poskytne očištěná hmotnostní spektra.

Pro chemometrické zpracování dat byla využita funkce SW umožňující alignment dat. Sloučeniny z prvního vzorku se signálem k šumu větším než definovaný limit (na automaticky vybrané unikátní hmotě) byly exportovány do tabulky (matice: vzorek x sloučenina určená tentativní identifikací, retenčním časem a kvantifikační hmotou ze spektra). Maximální dovolená diference retenčního času byla nastavena v souladu s modulační periodou v případě 2D měření, resp. určitá malá diference v řádu jednotek sekund v případě jednodimenzionálního měření. Dále bylo vyžadováno, aby shoda spekter pro stejnou látku mezi vzorky byla alespoň 60 %. Tabulka byla vyexportována do MS Excel a bylo provedeno manuální čištění dat, zejména spočívající v odstranění signálů nepříslušejících k předpokládanému profilu vzorku (porovnání s tzv. blank stanovením, tedy slepým vzorkem). Takto byly odstraněny zejména signály kontaminantů uvolňovaných z kolony a z rozpouštědel, jež vzorky absorbovaly v průběhu přípravy v laboratoři zpracování dřeva, resp. v laboratoři pro chemické analýzy. Dále byla data normalizována (konstantní suma přes řádek, resp. sloupec) a poté vyhodnocena pomocí analýzy hlavních komponent (PCA) a pomocí částečné analýzy nejmenších čtvercových diskriminantů (PLS-DA) v softwaru SIMCA 15 a 17 (Sartorius Stedim Data Analytics AB, Malmö, Švédsko).

6 Výsledky a diskuze

V následujícím textu jsou uvedeny výsledky získané měřením prostřednictvím GC-MS za použití rozdílných technik, a to pomocí termální desorpce z trubiček se sorbentem Tenax TA[®] a pomocí termální desorpce z SPME. Jednotlivé výsledky odpovídají jednotlivým okruhům experimentálních měření a jsou členěny dle testovaného materiálu a použité techniky.

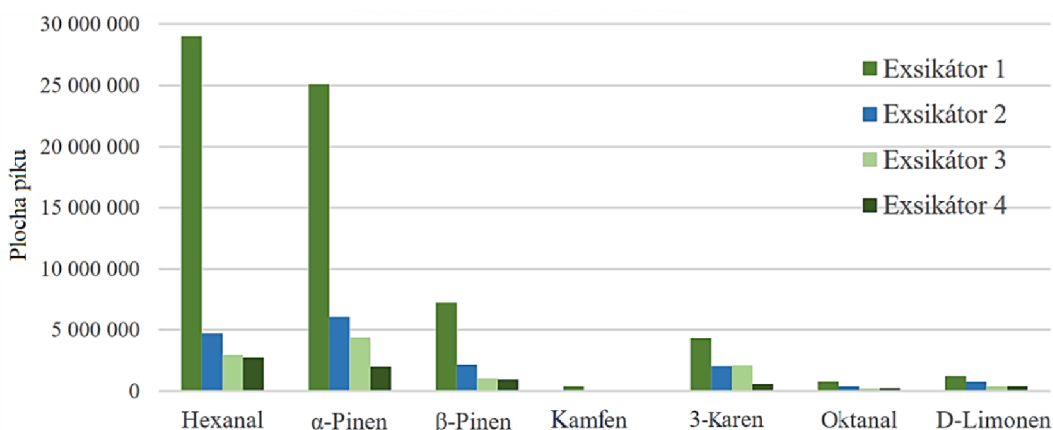
Výsledky analýzy OSB panelů jako konstrukčních desek aplikovaných v dřevěných konstrukcích tvoří první část. V druhé části jsou prezentovány hodnoty emise VOCs z konopného pazdeří. Třetí část prezentuje výzkum izolačních materiálů a materiálů s potenciálem použití jako izolační vrstvy v dřevostavbách. Čtvrtá část zahrnuje stanovení VOCs emitovaných ze dřeva s možnou variabilitou použití v interiéru budov. Výsledky jsou konfrontovány se zjištěními dalších autorů.

6.1 VOCs z konstrukčních desek dřevostaveb

Dle nařízení vlády č. 163/2002 Sb. spadají OSB do kategorie stavebních materiálů, které při uvádění na trh podléhají certifikované laboratorní zkoušce na emisi těkavých látek.

Porovnání vzorků bylo provedeno na základě komparace plochy piků. Výsledné hodnoty a chromatografy jsou zobrazeny v **Příloze č. 2**.

Obr. 13 odkazuje na vzorky analytu odebrané 3. den od uložení OSB v exsikátorech. Tyto vykazovaly značnou variabilitu v případě porovnání skupiny vzorků modifikovaných a vzorku bez modifikace.

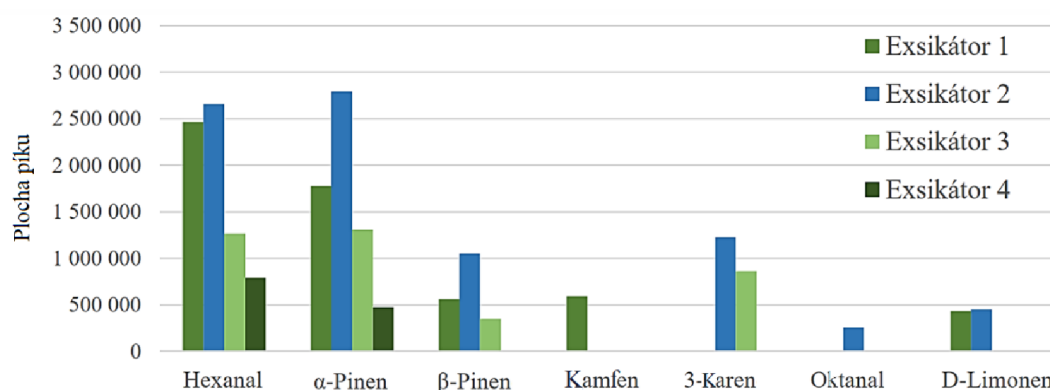


Obr. 13 Kvalitativní porovnání emise VOCs z OSB 3. den: Exs. 1 – OSB bez modifikace, Exs. 2 – OSB s broušeným povrchem, Exs. 3 – OSB mod. kys. citronovou, Exs. 4 – OSB mod. kys. vinnou

Broušení povrchu desky (Exs. 2) se jeví jako efektivní modifikace; ještě lepších výsledků je dosaženo v případě postřiku povrchu kyselinami. Nejnížší hodnoty VOCs, a to u všech vybraných pozorovaných látek, vykazuje vzorek po aplikaci kyseliny vinné

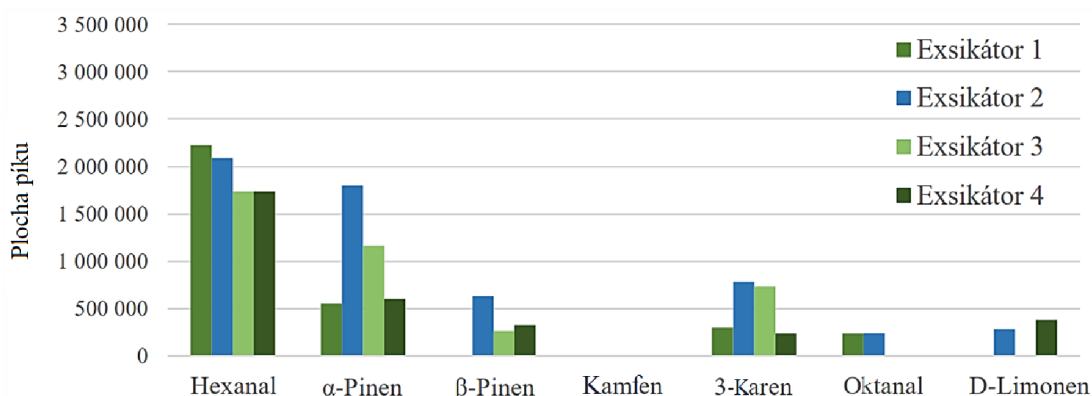
(Exs. 4). Při jejím použití významně klesla emise nejvíce diskutovaných VOCs – potenciálně karcinogenního hexanalů a α -pinenu. Tato zjištění korespondují s výsledky Wilke *et al.* (2013), který porovnává OSB od několika výrobců. Nejvyšší emise jsou sledovány v případě hexanalů, následovaného acetonem a α -pinenem. Hexanal se současně jeví jako vhodný marker pro stanovení emise dalších aldehydů. Zpravidla je právě jeho vyšší emise spojena s vyššími emisemi ostatních aldehydů.

7. den od výroby byl pozorován značný pokles emisí VOCs zejména v případě vzorku referenčního – bez modifikace povrchu (Exs. 1). Ostatní vzorky vykazují kontinuální mírný pokles emise všech VOCs. V případě broušeného vzorku (Exs. 2) byla u všech vybraných látek evidována jejich vyšší koncentrace než v případě referenční desky, viz **Obr. 14**. V ostatních případech (Exs. 3 a 4), kdy mají všechny pozorované látky nižší koncentrace než u desky referenční, se provedená povrchová úprava jeví jako efektivní.



Obr. 14 Kvalitativní porovnání emise VOCs z OSB 7. den: Exs. 1 – OSB bez modifikace, Exs. 2 – OSB s broušeným povrchem, Exs. 3 – OSB mod. kys. citronovou, Exs. 4 – OSB mod. kys. vinnou

Jak je patrné z **Obr. 15**, 14. den došlo v případě vzorku bez modifikace a vzorku s broušeným povrchem k významnému poklesu emise hexanalů i α -pinenu.

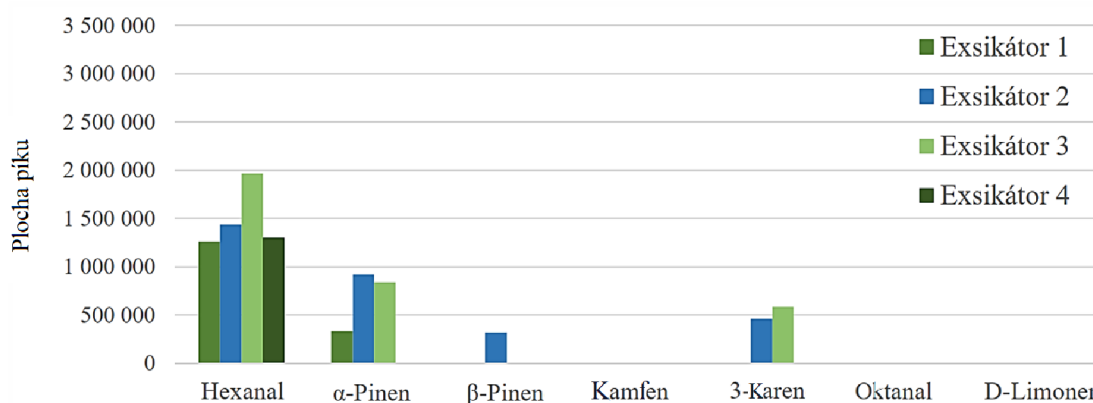


Obr. 15 Kvalitativní porovnání emise VOCs z OSB 14. den: Exs. 1 – OSB bez modifikace, Exs. 2 – OSB s broušeným povrchem, Exs. 3 – OSB mod. kys. citronovou, Exs. 4 – OSB mod. kys. vinnou

V případě desky s povrchem modifikovaným postřikem kyselinou citronovou (Exs. 3) se snížila emise α -pinenu a ostatních VOCs, emise hexanalů však mírně vzrostla. V případě kyseliny vinné došlo k růstu emise všech vybraných VOCs.

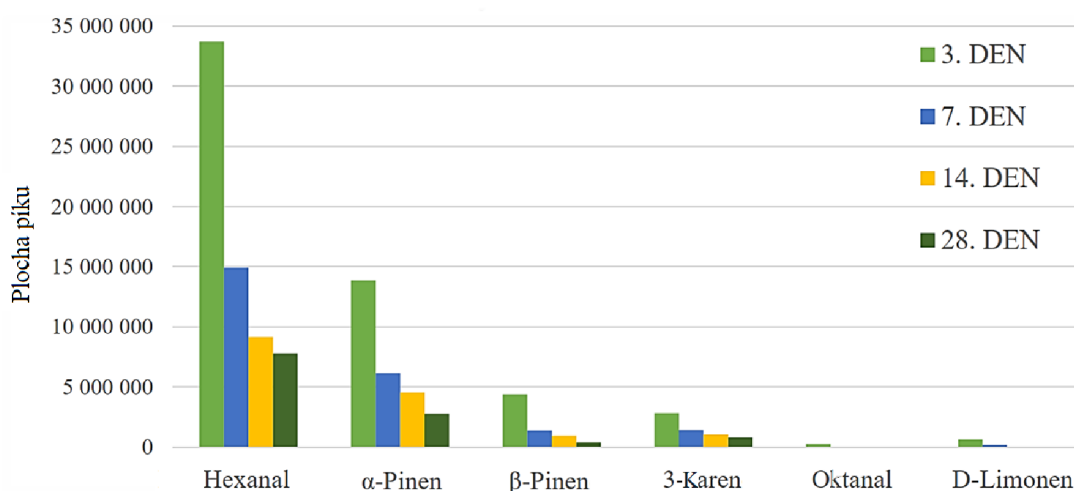
Tato skutečnost je velmi pravděpodobně dána designem experimentu, kdy v exsikátorech nedochází ke kontinuálnímu průtoku vzduchu; tyto jsou promývány vždy 1 hodinu před samotným odběrem. Lze tudíž očekávat vyšší koncentraci VOCs zadržených v exsikátorech způsobené delším intervalem mezi 2. a 3. odběrem vzorku vzduchu.

V případě všech vybraných VOCs byla u referenční desky pozorována nejnižší emise 28. den. Současně byla zaznamenána nejvyšší emise hexanalů v případě postřiku kyselinou citronovou (Exs. 3) v porovnání s ostatními vzorky, viz **Obr. 16**. U všech ostatních látek došlo k poklesu jejich koncentrace na hranici detekce – LOD, a to v případě všech realizovaných modifikací.



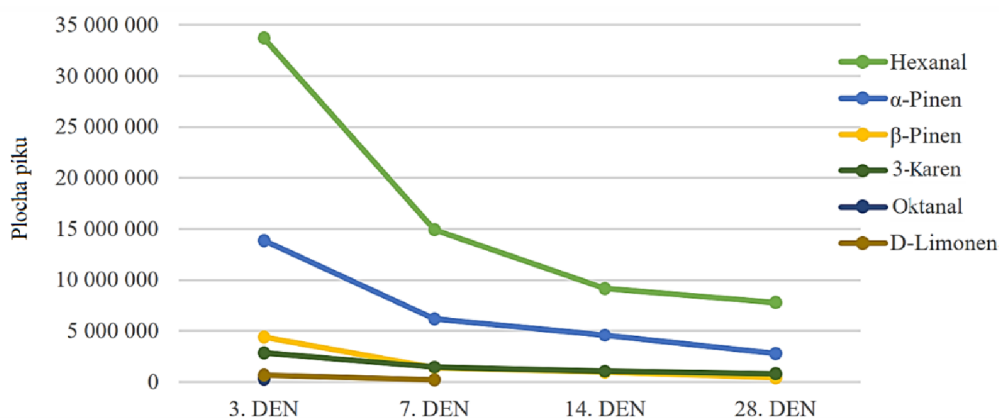
Obr. 16 Kvalitativní porovnání emise VOCs z OSB 28. den: Exs. 1 – OSB bez modifikace, Exs. 2 – OSB s broušeným povrchem, Exs. 3 – OSB mod. kys. citronovou, Exs. 4 – OSB mod. kys. vinnou

Vzorek OSB (300 x 500 mm) uložený na 28 dní do zkušební komory o objemu 1 m³ byl promýván čistým vzduchem, viz **Příloha č. 3**. Odběr a analýza vzorků vzduchu nasyceného VOCs byla provedena 3., 7., 14. a 28. den od vyzvednutí vzorku z výroby a jeho umístění do zkušební komory. Výsledná pozorování poukazují na kontinuální klesající trend emise VOCs s přibývajícím dnem, viz **Obr. 17**. Současně je v případě všech měření zdůrazněna nejvyšší emise hexanalů v porovnání s ostatními látkami.



Obr. 17 OSB modifikovaná 6% roztokem kyseliny citronové: koncentrace vybraných VOCs ve zkušební komoře 3. – 28. den od produkce

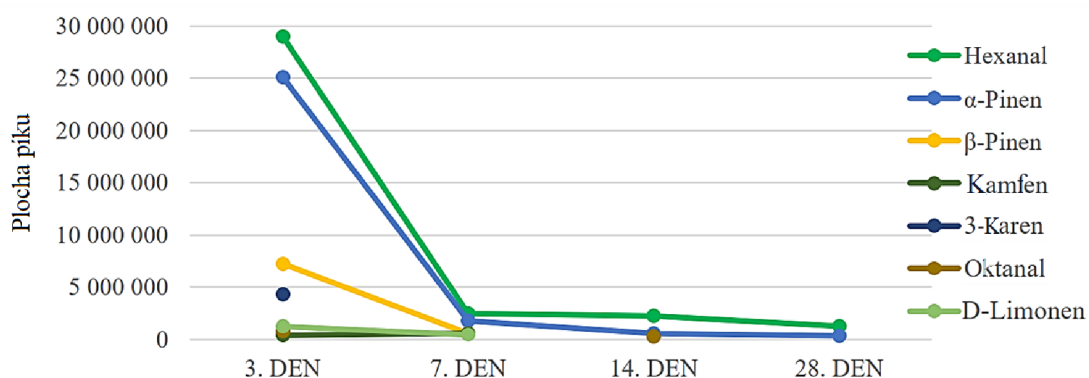
Obdobný trend průběhu emise (3. a 28. den) zejména u aldehydů a terpenů (**Obr. 18**) lze pozorovat ve studii Ohlmeyera *et al.* (2008), který analyzoval průmyslově vyrobené desky s hlavní příměsí v podobě jádrové borovice. Wilke *et al.* (2013) pak sledoval obdobný vývoj emise hexanal, α -pinenu a 3-karenu při uložení vzorku OSB ve zkušební komoře s kontinuálním průtokem vzduchu a při odběru vzorku na trubičky s Tenax TA[®]. Toto porovnání poukazuje na vhodné nastavení metody i parametrů analýzy GC-MC.



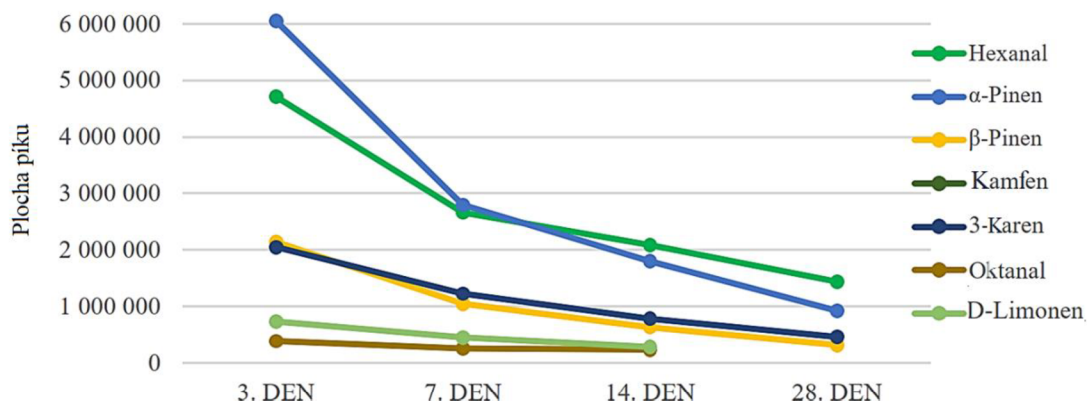
Obr. 18 OSB modifikovaná 6% roztokem kyseliny citronové: pokles koncentrace vybraných VOCs ve zkušební komoře v průběhu 28 dní

Grafy na **Obr. 19, 20, 21, 22** prezentují naměřené hodnoty a průběh emise vybraných VOCs 3. – 28. den od produkce desky s ohledem na jednotlivé modifikace povrchů.

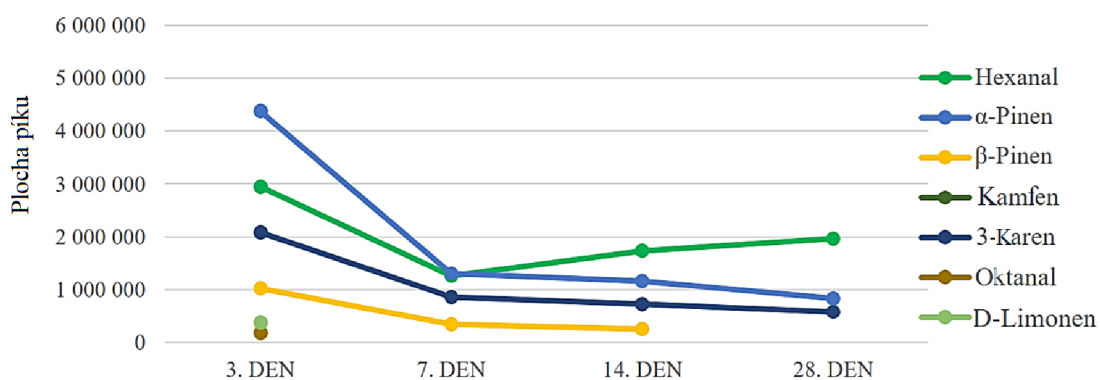
V rámci realizované části experimentu byla prokázána přítomnost látek spadajících do seznamu těkavých látek dle ISO 16000-6 (2011). Zároveň byl pozorován pozitivní vliv všech aplikovaných modifikací na snižování emisí těchto látek z OSB desek. V rámci všech provedených měření byla v jednotlivých odběrových dnech sledována vyšší koncentrace VOCs v případě referenčního vzorku v porovnání se vzorky modifikovanými. Kontinuální pokles emise VOCs byl současně zaznamenán v průběhu času. Tento jev byl prokázán také v případě vzorku uloženého ve zkušební komoře.



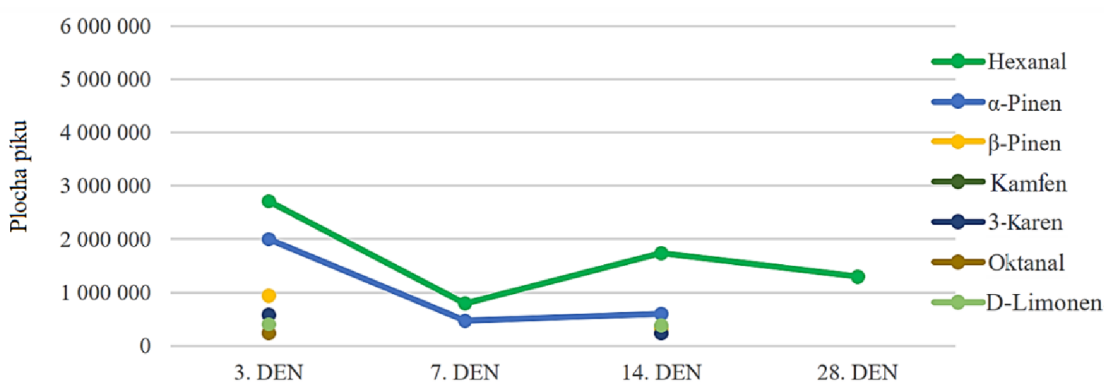
Obr. 19 OSB bez modifikace: průběh emise vybraných VOCs 3. – 28. den



Obr. 20 OSB s broušeným povrchem: průběh emise vybraných VOCs 3. – 28. den



Obr. 21 OSB – postřik povrchu kyselinou citronovou: průběh emise VOCs 3. – 28. den



Obr. 22 OSB – postřik povrchu kyselinou vinnou: průběh emise vybraných VOCs 3. – 28. den

Jako nejefektivnější modifikace se jeví postřik horké OSB desky 6% kyselinou vinnou, poté postřik 6% kyselinou citronovou a následně broušení povrchu desky. Všechny úpravy povrchu však vykazují výrazně nižší emise VOCs než vzorek referenční, a to zejména v prvních dnech po aplikaci modifikace, kdy je současně nejvyšší sledovaná emise VOCs v případě referenčního vzorku.

V rámci tohoto zjištění lze konstatovat, že odvětrání povrchu desky je významným aspektem vedoucím ke snížení emise VOCs z povrchu OSB. Tento faktor je neodmyslitelnou součástí technologického postupu výroby OSB. Dle informací od lokálního výrobce desek je však tento krok také s ohledem na zvýšení produkce a tlak

ze strany spotřebitelů neustále urychlován a čas věnovaný klimatizaci desek je zkracován. Takto produkovaný materiál se pak může stát potenciálním zdrojem emisí VOCs v konstrukci dřevostaveb s rizikem přenosu VOCs do vnitřního prostředí budov. Jednoduché chemické modifikace mohou vést ke snížení emise neprodleně po zalisování desky, kdy je pozorována nižší emise v průběhu prvních 3 dnů od výroby. V případě, že by bylo možné rozšířit výrobní linky o nástřiková zařízení, která by po zalisování desky umožňovala také zkrápění povrchu kyselinou vinnou (případně citronovou) o nízké koncentraci, bylo by dle realizovaných zjištění možné redukovat emisi VOCs, především hexanalů až na 15 % počáteční hodnoty vzorku bez úpravy.

Závěrem hodnocení této části experimentu je nutné zdůraznit, že výsledné hodnoty VOCs v případě exsikátorů a v případě zkušební komory nejsou vzájemně porovnatelné s ohledem na rozdílný design experimentu v rámci aplikovaných metod. Je však patrný určitý obdobný trend v průběhu emise VOCs při měření vzorků OSB v exsikátorech a při měření ve zkušební komoře.

Wilke *et al.* (2013) v rámci realizovaného experimentu aplikoval obdobné antioxidanty – kyselinu vinnou a citronovou – avšak přímo na třísky, jakožto vstupní surovinu, a tyto pak sušil při 250 °C a 400 °C. Vzorek emise VOCs z těchto desek byl analyzován 3. – 49. den. Chemická modifikace vedla ke snížení emise hexanalů o téměř 2/3 oproti neošetřenému vzorku, a to v případě obou sušících teplot. Přítomnost hexanalů je navíc dobrým ukazatelem výskytu dalších aldehydů, a tedy i pravděpodobnosti jejich redukce v důsledku použití kyselých modifikací. U α -pinenu byl naopak pozorován nárůst emise zejména v případě sušení při 400 °C. Tyto výsledky se liší oproti námi provedeným experimentálním šetřením.

Podle Ohlmeyera *et al.* (2008), má zásadní vliv na emisi VOCs použitá dřevina. Borové dřevo (jádrové) má při standardních interiérových podmínkách při teplotě 23 °C nejvyšší emisi VOC, a to v porovnání s dalšími druhy jehličnatých a listnatých dřevin. Nicméně při zahřátí na 60 °C se VOCs zkoumaných dřevin vyrovnávají.

Testované desky jsou vyrobeny ze směsi třísek, kde převládá borové dřevo. Pokud by bylo možné vyrábět jednodruhové desky např. z topolu (běžně v Severní Americe, kde je dostatek suroviny), lze předpokládat celkové snížení emise.

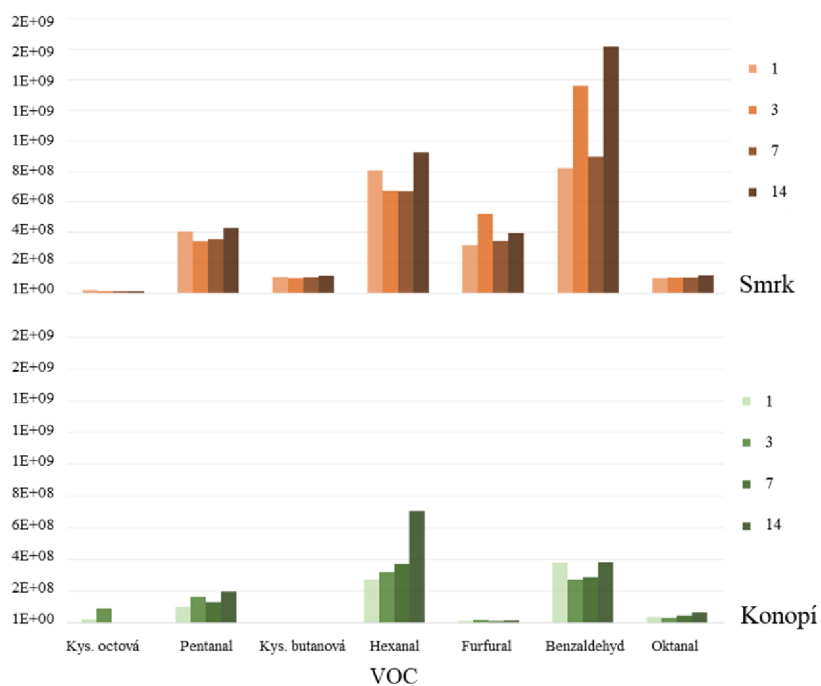
6.2 VOCs z konopného pazdeří

V rámci této části experimentálního šetření bylo nedestruktivním způsobem chemicky modifikováno konopné pazdeří. Emise VOCs byly stanoveny pomocí HS-SPME-GC-MS a porovnávány s konopným pazdeřím chemicky neošetřeným a neošetřenými smrkovými třískami.

Třináct klíčových těkavých organických sloučenin včetně karbonylových sloučenin, alkanů, aromatických uhlovodíků a terpenů bylo pozorováno v případě neošetřeného a chemicky ošetřeného konopného pazdeří. Cílové sloučeniny byly opět

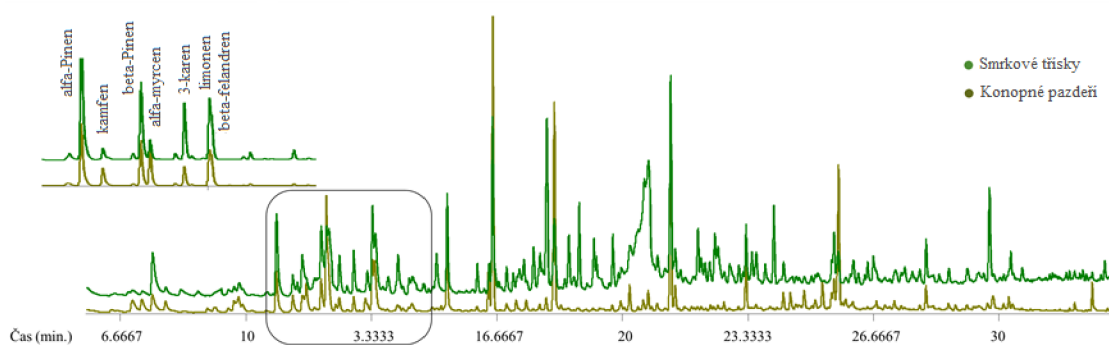
vybrány na základě seznamu zveřejněného v normě ISO 16000-6 (2011), která odkazuje na téma VOCs ze stavebních výrobků ve vnitřním ovzduší budov a seznam látek daný AgBB. Vybrané látky byly porovnány na základě sledování plochy chromatografických píků.

Obecně byl zjištěn vyšší počet předvybraných sledovaných těkavých organických sloučenin a jejich větší emise ze vzorku smrkových třísek oproti neošetřenému konopí (**Obr. 23**).



Obr. 23 Vybrané emise VOC ze smrkového dřeva a neošetřeného konopí (1., 3., 7., 14. den; odezva detektoru pro vybranou selektivní kvantifikační hmotu z hmotnostního spektra látky)

V obou neošetřených vzorcích (smrk a konopí) byla pozorována řada terpenů (např. α -pinen, β -pinen, kamfen, 3-karen a limonen a další), jejichž odezvy jsou vizualizovány v přeložených chromatogramech za pomoci vybrané charakteristické hmoty z hmotnostního spektra terpenů (**Obr. 24**). Celkově byl profil těkavých látek emitovaných ze smrkových třísek bohatší, co se týče četnosti individuálních sloučenin i jejich odezvy.



Obr. 24 Chromatogram emise VOCs ze smrku a neošetřeného konopí se zaměřením na terpeny

Z vybraných sledovaných látek se výrazněji vyšší emise z konopného pazdeří potvrdila pouze u kamfenu a β -Myrcenu. Uvedené zjištění tak odpovídá očekávanému vyššímu obsahu extraktivních látek ve smrkovém dřevě v porovnání s alternativním biologickým materiálem (Sumin, 2009; Chen, 2014) (**Tab. 18**).

Tab. 18 Porovnání sledovaných emisí VOCs naměřených 1. den experimentu (v %)

VOC	Smrkové třísky	Konopné pazdeří	Konopné pazdeří A	Konopné pazdeří B	Konopné pazdeří C
Kys. octová	87	100	391	770	26
Pentanal	404	100	192	237	1275
Kys. butanová	1313	100*	250	275	/
Hexanal	295	100	222	211	139
Furfural	2625	100	88650	70225	767
α -Pinene	207	100	105	102	133
Kamfen	64	100	118	130	139
Benzaldehyd	217	100	209	184	251
β -Pinene	173	100	93	66	147
3-Oktanon	/	100*	/	600	800
β -Myrcen	46	100	102	100	138
Oktanal	272	100	256	197	114
Limonen	172	100	103	123	127

Pozn.: A – konopné pazdeří po ošetření kyselinou vinnou, B – konopné pazdeří po ošetření kyselinou citronovou, C – konopné pazdeří po ošetření hydrogenuhličitanem sodným

* U látek, jejichž emise nebyly detekovány, byly hodnoty nahrazeny 1/2 LOD

V případě smrkových třísek byla sledována o přibližně 15% nižší emise kyseliny octové než v případě neošetřeného konopí. Chemické ošetření konopného materiálu různými kyselinami emise této sloučeniny zvýšilo; úprava hydrogenuhličitanem sodným vedla k její inhibici. Navíc zvýšení emisí nízkomolekulárních organických kyselin není selektivní pouze pro kyselinu octovou. Např. kyselina butanová (máselná) vykazující zápach po žluklém másle nebyla v neošetřeném konopí ani ve vzorcích ošetřených hydrogenuhličitanem sodným vůbec detekována (signál pod limitem detekce – LOD), ale ošetření kyselinami výrazně zvýšilo její odezvy. Při ošetření hydrogenuhličitanem sodným byl v případě aldehydů (hexanal a oktanal) sledován inhibující efekt, nicméně emise jiných sloučenin (zejména terpenů) stoupaly. V tomto ohledu je však nutné zdůraznit, že přes celkově vyšší odezvy terpenů v případě takto upraveného konopí byly tyto stále výrazně nižší než odezvy naměřené v případě smrkových třísek. Jejich množství navíc klesalo s časem.

Malé zkušební komory – exsikátory byly použity k simulaci typických vnitřních podmínek v místnosti, kde nepřetržitě docházelo k částečné výměně vzduchu (Stachowiak-Wencek a Pradzyński, 2014). Po 14 dnech uložení v exsikátorech s konstantním průtokem vzduchu byl pozorován mírný pokles intenzity odezvy sledovaných sloučenin. **Tab. 19** zobrazuje procentuální změny v odezvě detektoru v průběhu doby uložení vzorku v exsikátoru; kdy jako referenční pro danou skupinu vzorků (100 %) slouží vždy 1. den měření. U kyseliny octové, kamfenu, β -myrcenu a limonenu došlo u všech vzorků k poklesu emise mezi 1. a 14. dnem. Zdrojová data pro vyhodnocení jsou zobrazena v **Příloze č. 4**.

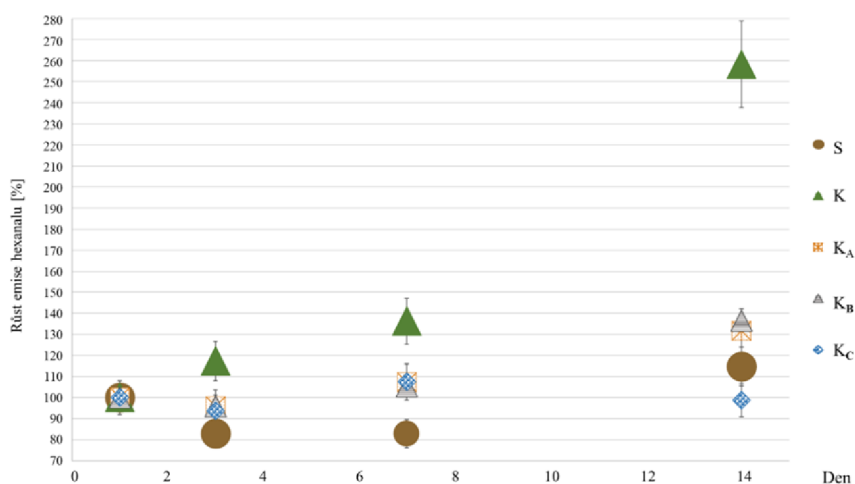
Tab. 19 Vývoj sledovaných emisí VOCs (v %) od 1. dne zahájení experimentu

Vzorek & doba uložení v exikátorech																				
VOC	Smrkové třísky				Konopné pazdeří				Konopné pazdeří A				Konopné pazdeří B				Konopné pazdeří C			
	1	3	7	14	1	3	7	14	1	3	7	14	1	3	7	14	1	3	7	14
Kys. octová	100	65	60	60	100	391	9	9	100	69	42	42	100	38	25	19	100	100	33	17
Pentanal	100	84	87	106	100	165	131	198	100	94	78	95	100	90	76	81	100	84	48	43
Kys. butanová	100	93	98	108	/	/	/	/	100	100	110	130	100	105	114	118	/	/	/	/
Hexanal	100	83	83	115	100	117	136	258	100	96	107	132	100	96	105	136	100	94	108	99
Furfural	100	165	109	125	100	158	100	133	100	86	53	63	100	67	30	29	100	93	64	65
α -Pinen	100	533	204	354	100	43	37	4	100	105	85	40	100	84	94	37	100	88	100	34
Kamfen	100	121	53	93	100	44	36	1	100	104	81	40	100	78	82	33	100	89	98	33
Benzaldehyd	100	166	109	197	100	72	76	101	100	85	71	59	100	101	80	77	100	92	72	61
β -Pinen	100	140	36	288	100	45	39	/	100	108	96	48	100	99	133	61	100	94	100	36
3-Oktanon	/	/	/	/	100	400	400	400	/	/	/	/	/	/	/	/	100	75	100	50
β -Myrcen	100	120	50	83	100	39	37	2	100	94	80	38	100	77	90	37	100	94	95	31
Oktanal	100	103	103	118	100	86	128	181	100	95	88	98	100	0	111	115	100	112	107	124
Limonen	100	110	61	18	100	40	40	19	100	102	78	41	100	0	78	33	100	100	99	36

Pozn.: A – konopné pazdeří po ošetření kyselinou vinnou, B – konopné pazdeří po ošetření kyselinou citronovou, C – konopné pazdeří po ošetření hydrogenuhličitanem sodným

V případě pentanalu byl pozorován jeho pokles po aplikaci chemických modifikací, ne však u vzorků neošetřených. Pentanal je společně s významnějším aldehydem hexanalem známý jako produkt oxidace nenasycených mastných kyselin (Sumin, 2009). Obě tyto sloučeniny způsobují nepříjemný, někdy také dráždivý pach (NIOSH, 2018); v nízkých koncentracích např. způsobují typický zápach papíru (Risholm-Sundman *et al.*, 1998).

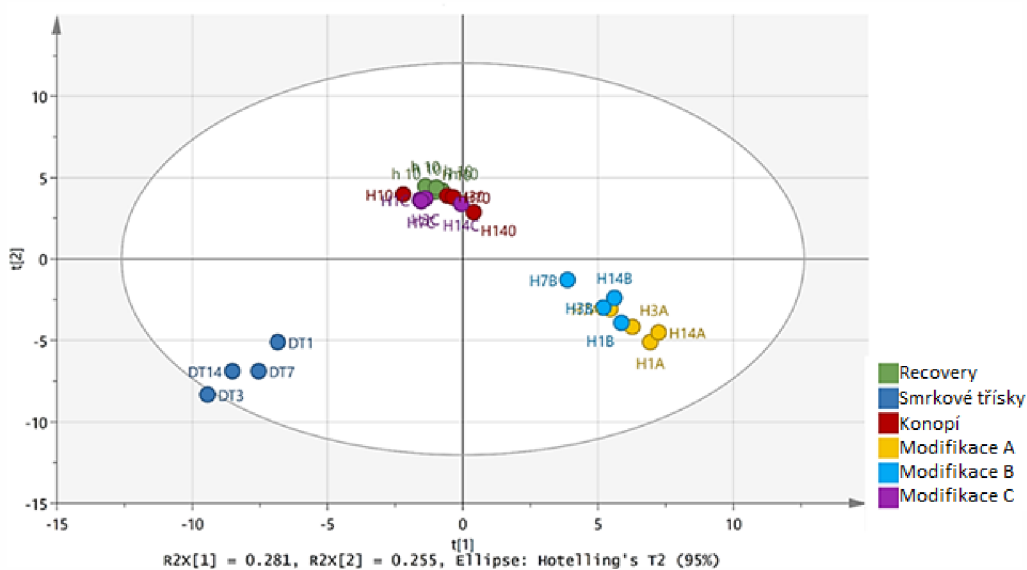
Odezva hexanalu, který se vyznačuje vůní po čerstvě posekané trávě (Ernstgård *et al.*, 2006). Ve všech vzorcích, s výjimkou ošetření hydrogenuhličitanem sodným, rostla v průběhu skladování (**Obr. 25**).



Obr. 25 Změna emisí hexanalu (v %) u testovaných materiálů po skladování v exsikátorech (1., 3., 7., 14. den); jedinečná intenzita hmoty první odběrový den byla považována za 100 %. Chybové úsečky představují dvojnásobnou relativní směrodatnou odchylku měření intenzity hexanalu u 7 testovaných vzorků (8 %). (S – smrkové třísky, K – neošetřené konopné pazdeří, KA – konopné pazdeří po ošetření kyselinou vinnou, KB – konopné pazdeří po ošetření kyselinou citronovou, KC – konopné pazdeří po ošetření hydrogenuhličitanem sodným).

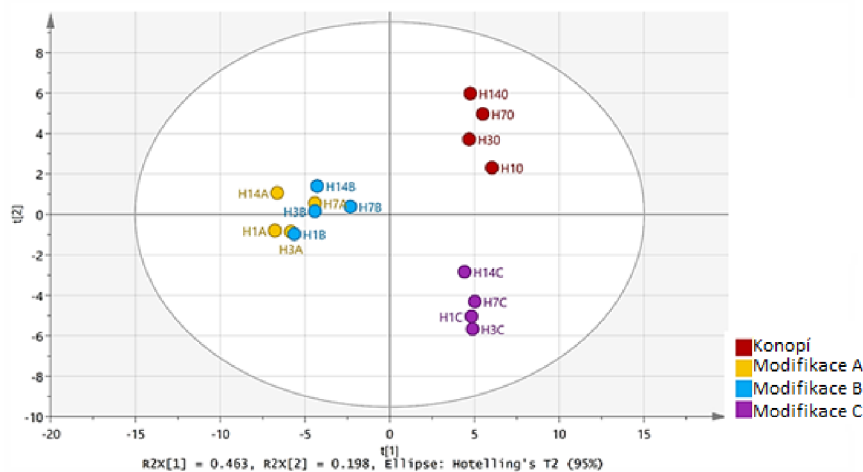
Tento jev, zejména u neošetřeného konopného materiálu může být způsoben postupným uvolňováním do ovzduší a/nebo probíhající oxidací přítomných mastných kyselin ve vzorku. Nebylo ověřováno, zda tento trend dosáhne v reálném čase vrcholu a následně budou emise z materiálu klesat, nicméně, dá se předpokládat, že aplikací vyšších teplot při zpracování této vstupní suroviny by došlo k rychlejšímu vytěkání a stabilizaci materiálu z hlediska emise této látky.

Profil těkavých látek byl při necílové analýze po předběžném zpracování vyhodnocen pomocí PCA (vysvětluje 80 % variability v datasetu), přičemž se ukázalo vyčlenění vzorků smrkových třísek od všech ostatních vzorků konopí z důvodu vyšších relativních odezev typických látek smrkové pryskyřice – alfa- a beta-pinenu. Vedle toho jsou v grafu komponentního skóre zahrnuty body reprezentující vzorky opakovaně měřeného neošetřeného vzorku konopného pazdeří (*Recovery*). Jejich měření v průběhu sekvence vzorků a jejich následné shlukování v jednom místě grafu je považováno za znak dobře provedeného experimentálního stanovení. Graficky se tak dokazuje, že profily těkavých látek z nezávisle připravených a měřených vzorků (z jednoho směšného vzorku) lokalizují bod reprezentující daný vzorek do jednoho místa grafu (**Obr. 26**). Takto ověřená opakovatelnost stanovení profilu těkavých látek legalizuje měření ostatních vzorků bez opakování. Vzorky pro vyjádření opakovatelnosti a vzorky smrkových třísek byly pro další vyhodnocení z datasetu odstraněny.



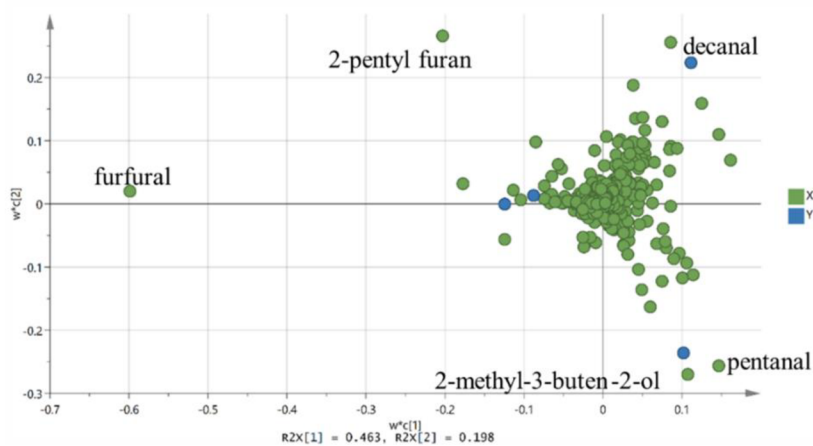
Obr. 26 PCA graf komponentního skóre pro konopí vč. opakovatelnosti: h10 – Recovery vzorek opakovatelnosti, H1-14 – konopí bez ošetření, H1A-14A – konopí a kyselina vinná; H1B-14B – konopí a kyselina citrónová; H1C-14C – konopí a hydrogenuhličitan sodný

Za účelem dalšího zkoumání rozdílů mezi modifikacemi samotného konopí byla provedena částečná diskriminační analýza nejmenších čtverců (PLS-DA), uvažuje třídy vzorků dle doby klimatizace v exikátorech a dle ošetření; z hlediska doby nebyla sledována žádná výrazná separace. Diferenciace bylo dosaženo dle typu ošetření ($R^2XCum = 66 \%$, $R^2Y = 62 \%$, $Q^2cum = 53 \%$). (**Obr. 27**).



Obr. 27 PLS-DA graf komponentního skóre pro konopí: H1-14 – konopí bez ošetření, H1A-14A – konopí a kyselina vinná; H1B-14B – konopí a kyselina citrónová; H1C-14C – konopí a hydrogenuhličitan sodný

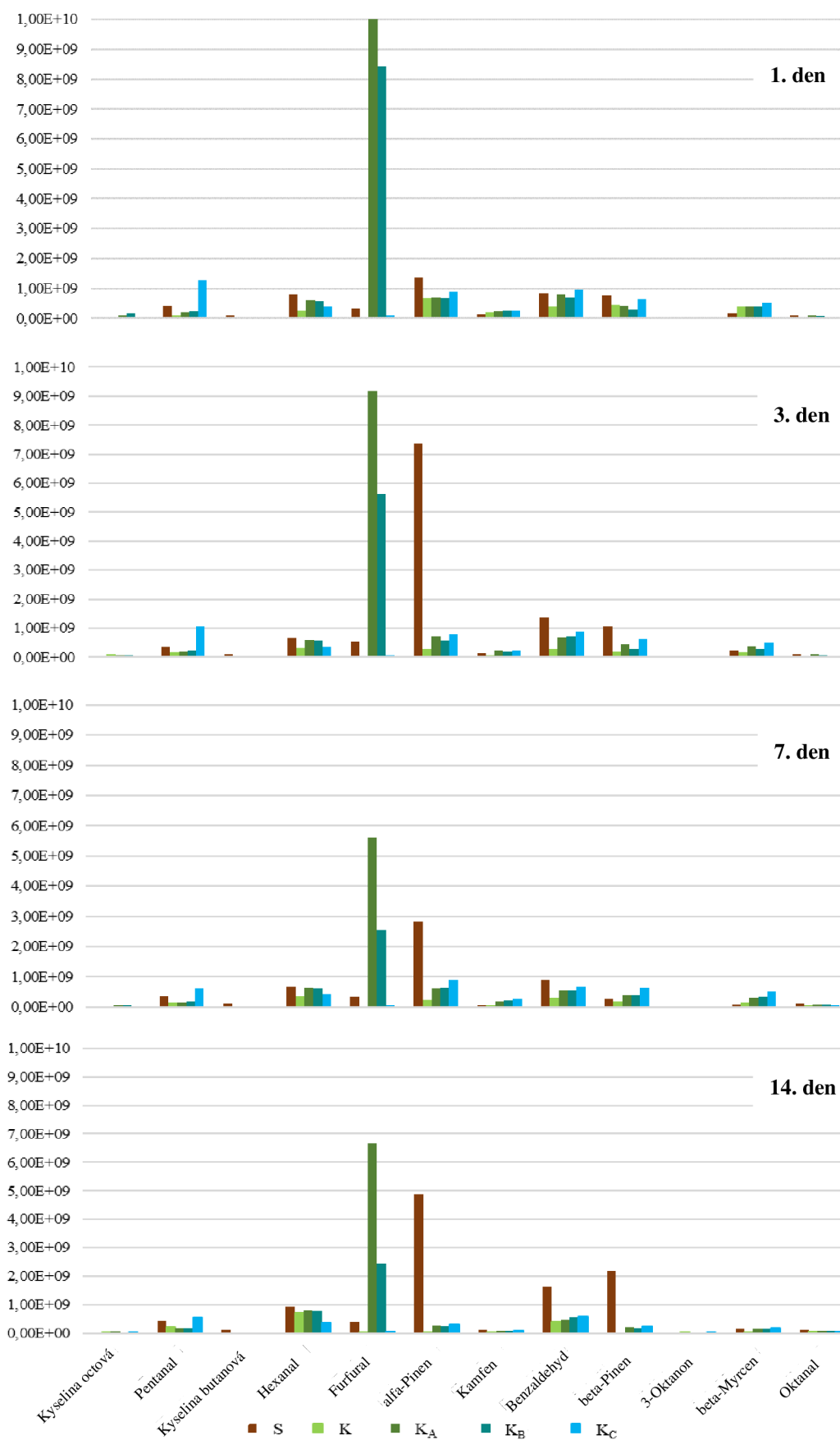
V případě konopí tvořily oba vzorky ošetřené kyselinami jednu skupinu, a to zejména kvůli vyššímu výskytu furfuralu (**Obr. 28**). Furfural může vznikat při tepelném namáhání v důsledku degradace polyóz (hemicelulózy) (Salthammer a Fuhrmann, 2000). Často je používán pro průmyslovou výrobu, v potravinářství, jako vonné látky ve výrobcích pro osobní hygienu nebo jako konzervační prostředek pro knižní papíry. Tato sloučenina je považována za relativně zdraví neškodnou (Eseyin a Steele, 2015).



Obr. 28 PLS-DA graf vlivů představující důležité markery pro jednotlivé modifikace: identifikace sloučenin založena na hmotnostní spektrální podobnosti a porovnání retenčních indexů

Vzorky konopí ošetřené hydrogenuhličitanem sodným se oddělily kvůli vyššímu relativnímu množství pentanalu a 2-metyl-3-buten-2-olu, které se používají jako vonná složka v kosmetice, parfémch, šampónech, toaletních mýdlech a dalších toaletních potřebách, jakož i v nekosmetických výrobcích, jako jsou domácí čističe a prací prostředky (Api *et al.*, 2015).

Vezmeme-li v úvahu surové neošetřené vzorky, vykazovalo konopné pazdeří ve srovnání se smrkem výrazně nižší množství celkových těkavých organických sloučenin v emisích, (získaných za stejných podmínek stanovení), jak je patrné z grafů vývoje emise v čase (**Obr. 29**).



Obr. 29 Vývoj emise vybraných VOCs ze smruku a konopí v čase (S – smrkové třísky, K – neošetřené konopné pazdeří, K_A – konopné pazdeří a kyselina vinná, K_B – konopné pazdeří a kyselina citronová, K_C – konopné pazdeří a hydrogenuhličitan sodný)

V průběhu času je vidět klesající tendence odezev v emisích. Na druhou stranu ale nebyl prokázán kýžený efekt chemických modifikací na celkové snížení emise VOCs z konopného pazdeří. Různé chemické modifikace dřevitých komponent konopného jádra, jako jsou hemicelulózy, lignin a extraktiva měly na různé komponenty monitorovatelné v emisích z materiálu různý vliv.

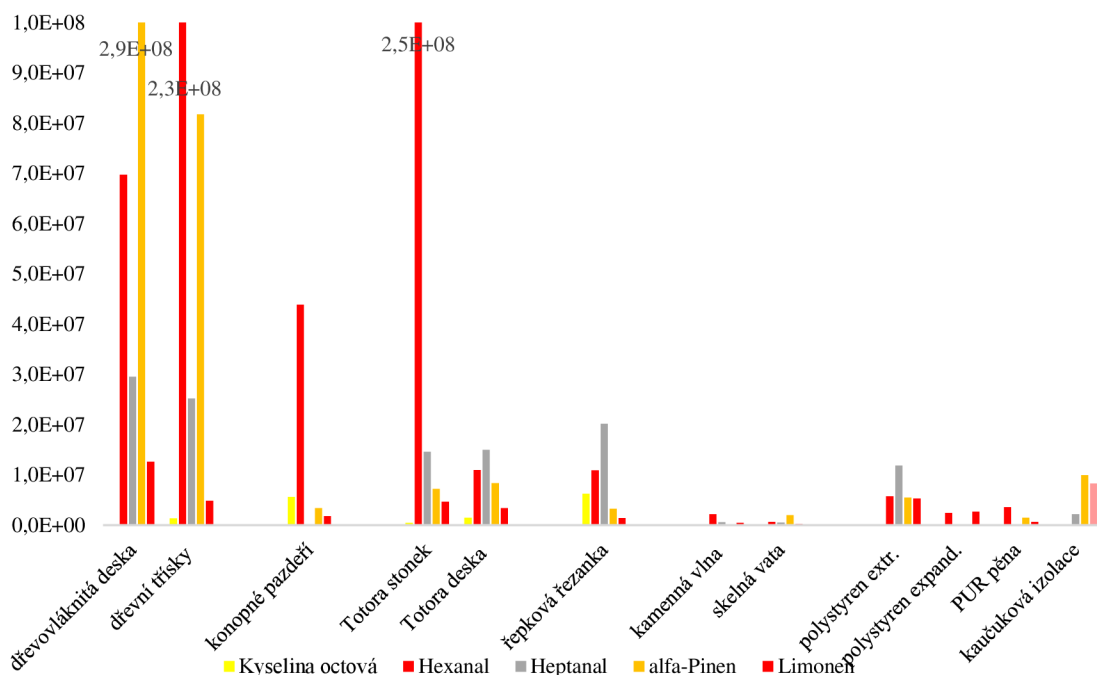
Z hlediska testovaných modifikátorů se zdá být nejvhodnější hydrogenuhličitán sodný. Příměs sody se v současnosti používá jako protihorelavé aditivum při výrobě izolací z konopí. Lze konstatovat, že materiál z jednoletých rostlin – jako je v oblasti biomateriálů konopné pazdeří – emituje do prostředí v porovnání se smrkovými třískami, jakožto potenciálním vstupním materiálem do výroby dřevité izolace, menší množství těkavých organických látek.

6.3 VOCs z izolačních komponent pro dřevostavby

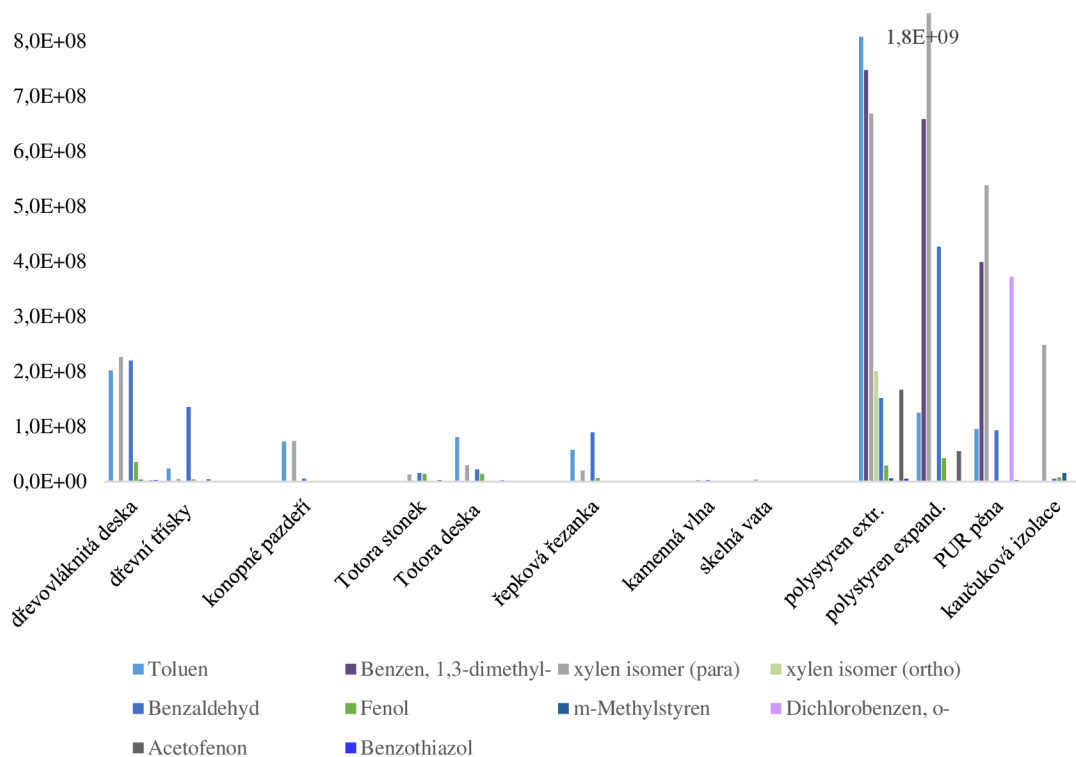
V rámci této práce byly pro lepší pochopení možného dopadu na kvalitu vnitřního prostředí analyzovány a porovnány emise těkavých látek z dalších materiálů se stávajícím či s potenciálním využitím jako tepelná izolace, resp. materiál pro její výrobu. Zkoumány byly emise z řezanky z řepky olejné (*Brassica napus*), měkké dřevovláknité desky a třísky z odpadního dřeva, nadrcené stonky rákosu *Totora* a lisované desky z totory bez aditiv a pojiv, minerální vlna (kamenná vlna a skelná vata), kaučuková izolace a polystyren (expandovaný a extrudovaný), PUR pěna a neupravené konopné pazdeří. Tyto vzorky byly měřeny (bez ohledu na jejich původ a dobu skladování v prostorách univerzity) v jedné sekvenci za použití HS-SPME-GC-MS (Pegasus 4D).

Pět vybraných těkavých organických sloučenin přírodního charakteru, primárně aldehydů a terpenů bylo detekováno s významnou intenzitou zejména z izolačních materiálů biologického původu, viz **Obr. 30**. Emise VOCs z řepkové řezanky, konopného pazdeří a zalisované desky z vláken totory odpovídají z hlediska většiny uvedených látek hodnotám extrudovaného polystyrenu. Další materiály (kamenná vlna, skelná vata, expandovaný polystyren a PUR pěna) jsou z pohledu uvedených látek mnohem menším zdrojem emisí. Hodnoty uváděné v grafech jsou již očištěny o odezvu pozadí – emise těchto látek v místě skladování materiálů. Nicméně, jelikož se jednalo o materiály různě dlouho skladované, nelze vyloučit, že přítomnost některých těchto látek je i tak způsobena kontaminací prostřednictvím sorpce těchto látek do materiálu.

V případě těkavých látek, jež jsou považovány za rezidua syntetického původu, bylo vybráno 10 sloučenin (**Obr. 31**). Tyto se primárně vyskytují v polystyrenech, PUR pěně a kaučukové izolaci. Jejich emise je přímo spojená s podstatou jejich výroby, kdy základním stavebním pilířem jsou deriváty benzenu. Odezva toluenu, a benzaldehydu v případě dřevovláknité desky je pravděpodobně způsobena sorpcí z prostředí. Hodnoty odezvy detektoru pro testované materiály jsou součástí **Přílohy č. 5**.



Obr. 30 Sloupcový graf ukazující přírodní, resp. přirozeně se vyskytující vybrané těkavé látky ve vzorcích testovaných izolačních materiálů a materiálů pro jejich výrobu



Obr. 31 Sloupcový graf ukazující rezidua syntetického původu vyskytující se ve vzorcích testovaných izolačních materiálů a materiálů pro jejich výrobu

Chemické složení surovin používaných při výrobě izolačních materiálů budov, resp. zjištěné odezvy VOCs v jejich emisích, představuje pouze jeden z faktorů ovlivňujících kvalitu vzduchu ve vnitřních prostorech. Uvolňování VOCs závisí však také na konstrukčním řešení (zapouzdření jiným materiálem, nebo nátěrovými hmotami) se

zvláštním důrazem na celkovou skladbu stěnových panelů. Proto je pro posuzování emisí nutné identifikovat emise VOCs z jednotlivých izolačních materiálů a případně vybrat vhodný obalový materiál, který zabrání jejich dalšímu šíření do interiéru. Toto téma bylo blíže rozebráno ve studiích Little *et al.* (2002), Yuan *et al.* (2005), a Hodgson (2003).

V rámci studie (Pavelek a Adamová, 2019) bylo zjištěno, že schopnost konstrukčních sendvičových panelů na přírodní bázi ukládat tepelnou energii je podobná jako u minerální vlny, která je konvenčně používaným tepelným izolantem.

Lze tedy konstatovat, že biologické materiály se osvědčily jako ekologická a energeticky účinná alternativa ke konvenčně používaným tepelným izolacím. Z hlediska lidského blahobytu neemitovaly lignocelulózy materiály – zejména řepková řezanka a deska z totory – větší množství VOCs ve srovnání např. s extrudovaným polystyrenem.

V případě porovnání součinitele tepelné vodivosti materiálů a emise benzaldehydu³ (Tab. 20), jakožto vybraného ukazatele zdravotní nezávadnosti pozorovaného u všech testovaných materiálů s izolačním potenciálem, má expandovaný polystyren nejvyšší emise ze všech testovaných materiálů, přestože se jeví jako jeden z nejlepších tepelných izolantů. Obdobně lze nahlížet také na pěnový PUR. Za nejlepší izolační materiál lze pak v obou ohledech považovat kaučukovou izolaci. Z materiálů biologického původu z hlediska emise této látky nejlépe vyhovuje konopné pazdeří.

Tab. 20 Emise benzaldehydu u vybraných izolačních materiálů a součinitel tepelné vodivosti (Pavelek a Adamová, 2019; K-flex izolace 2022; Steico, 2019)

Druh materiálu	Emise benzaldehydu	Součinitel tepelné vodivosti λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
skelná vata	4	0,035-0,045*
kamenná vlna	5	0,030-0,042*
kaučuková izolace	7	0,033*
konopné pazdeří	7	0,035– 0,050**
deska na bázi konopí	17	0,040*
rákos totora - stonek	18	0,045-0,056**
rákos totora - deska	24	/
řepková řezanka	91	0,048**
pěnový polyuretan - PUR deska	95	0,024-0,028*
dřevní třísky	137	0,065**
extrudovaný polystyren	153	0,029-0,038*
měkká dřevovláknitá deska	221	0,037-0,043*
expandovaný polystyren	429	0,031-0,040*

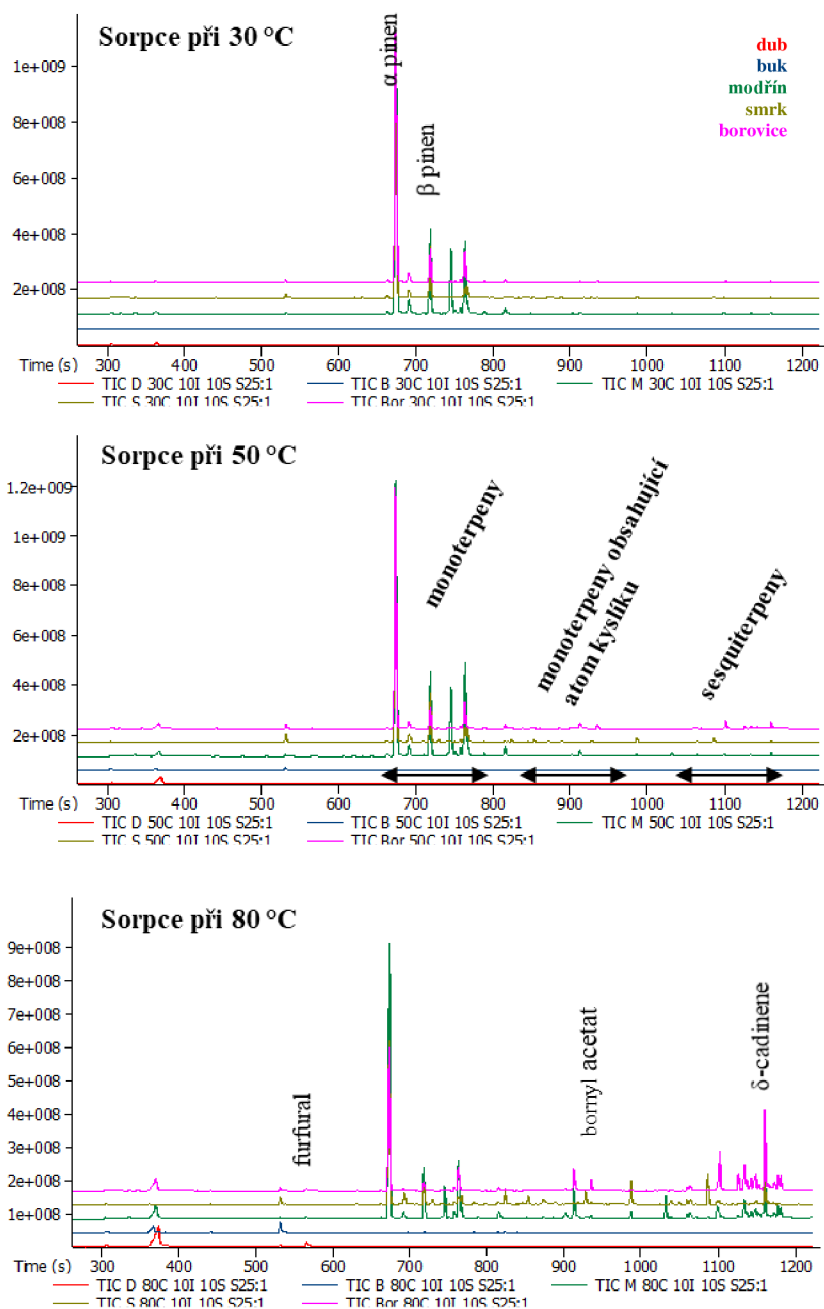
* Deklarovaná hodnota ** Návrhová hodnota

Pozn.: Vybrané hodnoty odezvy detektoru pro jedinečnou hmotu jsou děleny 10⁶

³ Benzaldehyd – aromatický aldehyd extrahovatelný z přírodních zdrojů anebo vyrobený čistě synteticky. Je toxický při kontaktu s kůží, může způsobit podráždění očí, je škodlivý při vdechování a může způsobit podráždění dýchacích cest, kůže a vyvolat alergickou reakci (PubChem, 2022).

6.4 VOCs ze dřeva pro aplikaci v interiéru staveb

V případě provedených analýz bylo nastavení SPME parametrů vždy testováno s ohledem na opakovatelný zisk co nejkomplexnější informace reprezentované profilem těkavých látek. Ukázka, jaký vliv má teplota inkubace a sorpce na emisi těkavých látek, respektive získanou informaci ukazuje na příkladu nejběžnějších dřevin **Obr. 32**. Z něj je patrné, že s rostoucí teplotou sorpce (od 30, 50 a 80 °C) narůstá intenzita výševroucích látek.

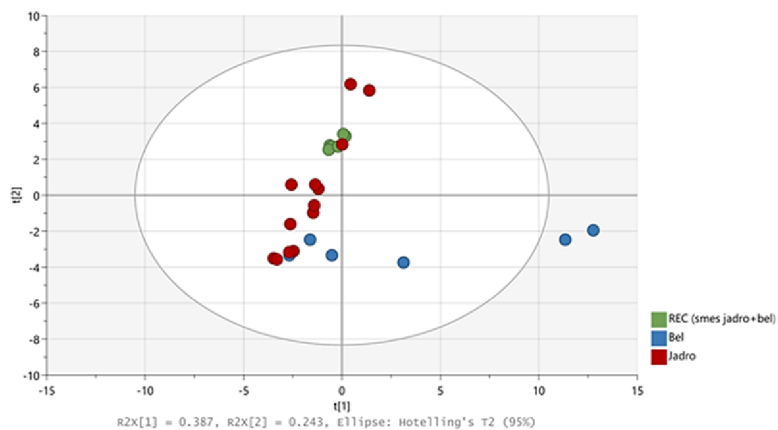


Obr. 32 Vliv teploty inkubace a sorpce (30, 50 a 80 °C) SPME vlákna na emisi VOCs (TIC D – dub, TIC B – buk, TIC M – modřín, TIC S – smrk, TIC Bor – borovice)

6.4.1 Stanovení těkavých látek z jádra a běli dubu

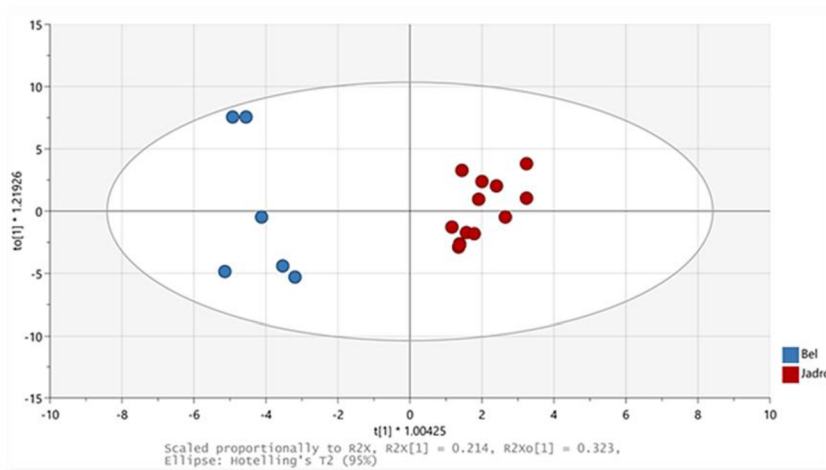
Z důvodu známých odlišností mezi jádrovým a bělovým dřevem v obsahu extraktiv byla technikou SPME/GC-MS analyzována odlišnost v profilech těkavých látek mezi jádrem a bělí.

Prvotní zobrazení bylo provedeno v PCA s důrazem na ověření opakovatelnosti celého postupu stanovení, jak již bylo diskutováno dříve. Z grafu komponentního skóre **Obr. 33** je patrné husté clusterování (shlukování) směsných vzorků připravených pro stanovení opakovatelnosti. Dva vzorky bělového dřeva se jeví z pohledu prvních dvou komponent jako odlehlé (leží mimo Hotellingovu elipsu, graficky znázorňující interval spolehlivosti 95 %), nicméně vzhledem k malému počtu vzorků a značné variabilitě pozorované mezi vzorky jádrového dřeva, byly tyto dva vzorky ponechány v datasetu pro další zpracování.



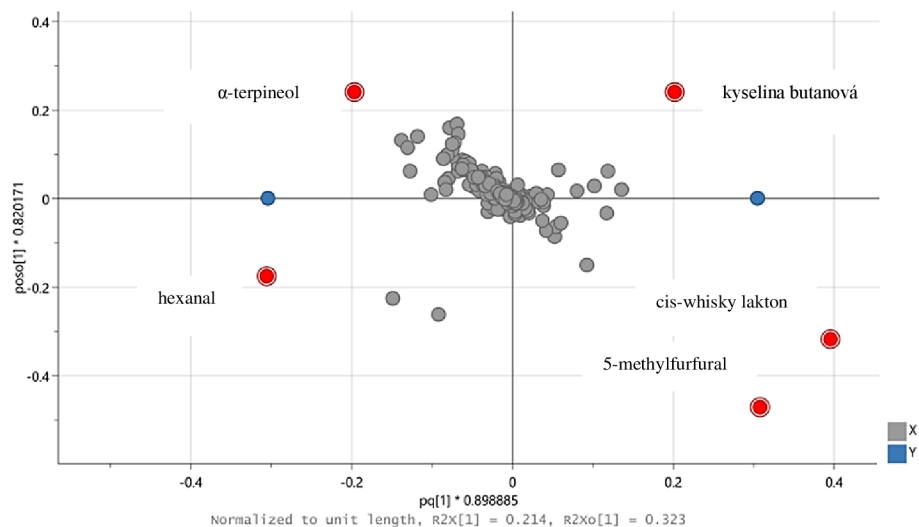
Obr. 33 PCA graf komponentního skóre: porovnání jádra a běli s ověřením opakovatelnosti experimentu

Po odstranění vzorků pro stanovení opakovatelnosti (*Recovery*) vysvětlovalo PCA stále 83 % variability skryté v datech. Pro lepší odlišení vzorků dle parametru jádro/běl byl zvolen model ortogonální diskriminační analýzy částečných nejmenších čtverců (OPLS-DA) speciálně designované pro hledání rozdílů mezi dvěma skupinami vzorků. Výsledná OPLS-DA ($R^2X_{cum} = 76 \%$, $R^2Y=95 \%$, $Q^2_{cum}=70 \%$) **Obr. 34**.



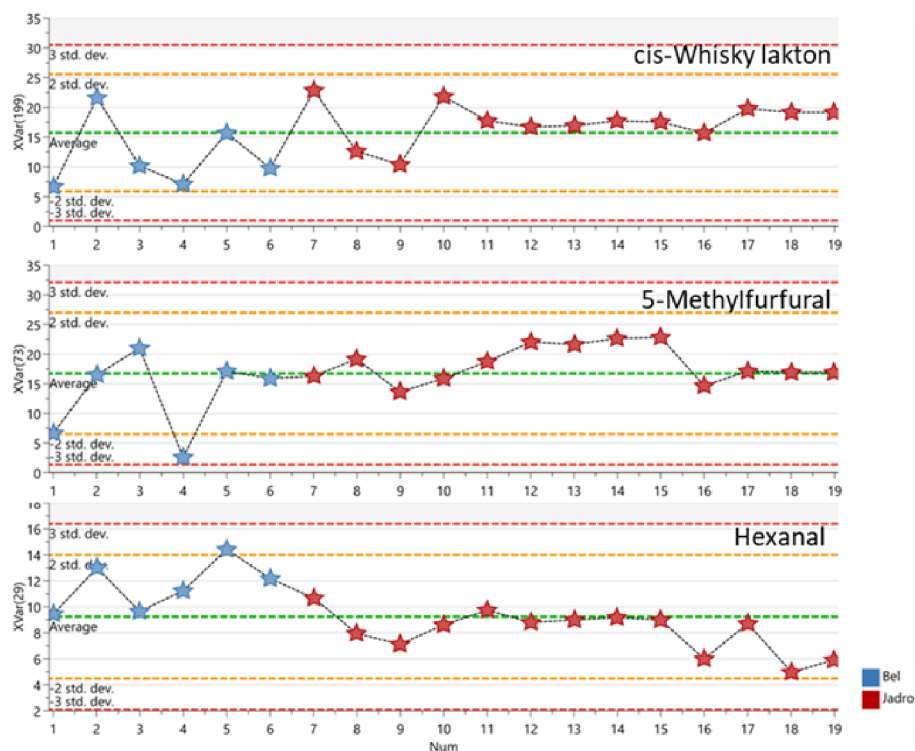
Obr. 34 OPLS-DA graf komponentního skóre: odlišení vzorků jádrového a bělového dřeva dubu

Sloučeniny nejvíce zodpovědné za separaci těchto dvou skupin jsou potom identifikovány v loading plotu **Obr. 35**.



Obr. 35 PLS-DA graf vlivů prezentuje důležité markery pro jednotlivou část kmene – jádro a běl. Identifikace sloučenin byla založena na hmotnostní spektrální podobnosti a porovnání retenčních indexů. Významnost identifikovaných sloučenin (kys. butanová, cis-whisky lakton, 5-methylfurfural a hexanal, α -terpineol) koreluje se vzdáleností od centrálního bodu; čím větší je vzdálenost, tím větší je význam markeru

Tzv. variable line ploty, neboli grafy zastoupení vybrané sloučeniny pro tři nejvýznamnější látky ukazuje **Obr. 36**. Z nich je opět patrná značná variabilita v zastoupení látky v jednotlivých vzorcích, nicméně trend většího či menšího zastoupení ve skupinách je také zřejmý.



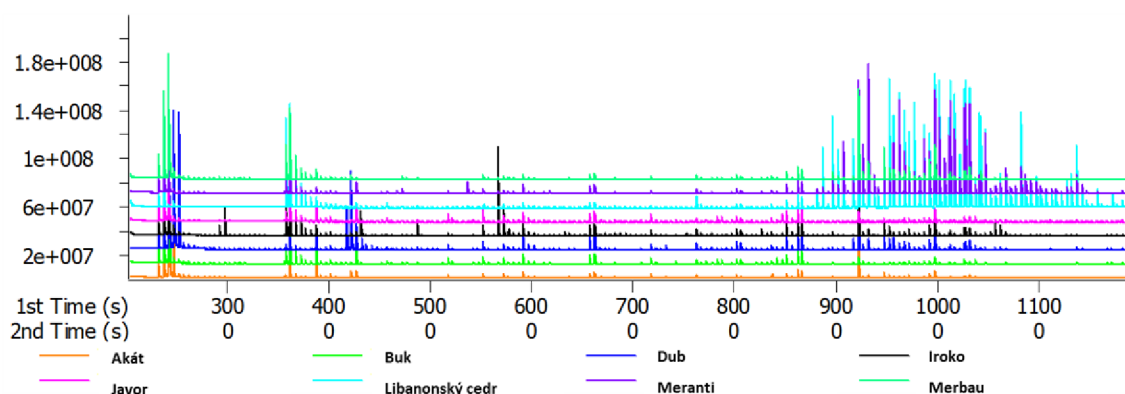
Obr. 36 Zastoupení hexanalů, cis-whisky laktonu a 5-methylfurfuralu v jádře/běli dubu

Například cis-whisky laktonu bylo v profilu těkavých látek jádrového dřeva více než v bělovém. Whisky lakton je typická látka právě pro jádrové dřevo dubu. V potravinářství se whisky lakton přirozeně extrahovaný z dubových sudů stará o vůni a chuť whisky a je zodpovědný za sladké a mastné aroma (Wiśniewska *et al.*, 2015). Obdobně 5-methyl-furfural je organická sloučenina rozpustná jak ve vodě, tak v organických rozpouštědlech. Může se tvořit v potravinách obsahujících cukr, zejména v důsledku zahřívání nebo vaření. Látka byla považována za potenciálně karcinogenní, nicméně z hlediska karcinogenních a genotoxických účinků nebyl zjištěn žádný dopad na člověka. Je klasifikován jako prostředek pro zlepšení potravin a primárně se používá v potravinářském průmyslu ve formě přísady jako ochucovadlo potravinářských výrobků a může být účinný proti hypoxii (He *et al.*, 2014). Jeho přítomnost je pravděpodobně dána degradací lignocelulózy (Ran *et al.*, 2014).

Hexanal v bělovém dřevě poukazuje na běžnou oxidační degradaci dřeva. Dle Cecchi (2015) může být emise hexanalů snížena vhodnými povrchovými úpravami. Surové dubové dřevo má tak vedle olejovaného a lakovaného nejvyšší emisi. V rámci realizované studie Jordão *et al.* (2006) byl pomocí SPME detekován vedle hexanalů také α -terpineol ze štěrpy dřeva dubu pyrenejského (*Quercus pyrenaica*) a zároveň 5-methyl-furfural ze dřeva dubu zimního (*Quercus petraea*).

6.4.2 Stanovení těkavých látek z termicky upraveného dřeva

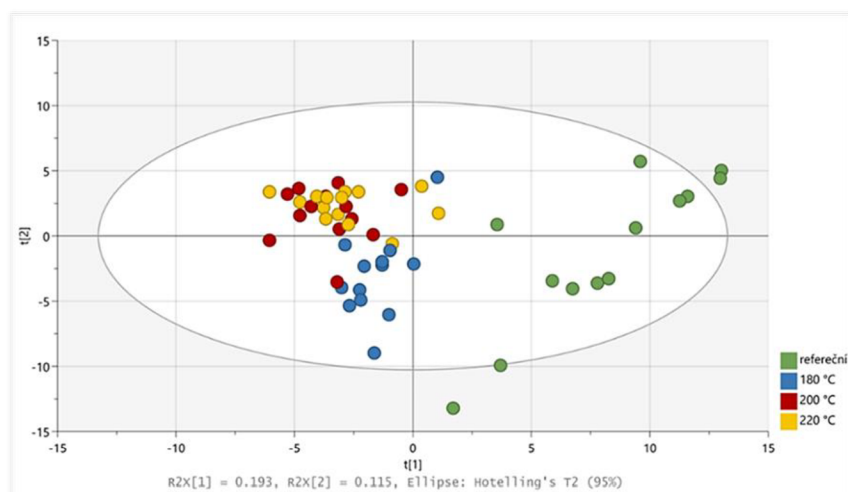
Profily těkavých látek zaznamenané technikou SPME-GC x GC-TOF MS při prvním pohledu ukazují určité odlišnosti mezi vzorky dřev, viz **Obr. 37**, kde jsou chromatogramy různých vzorků dřevin přeložené přes sebe s cílem poukázat na rozdílnost profilů a pík sledovaných látek (zejména zastoupení seskviterpenů je např. u vzorků libanonského cedru a meranti silně patrné). Současně ale tento obrázek ilustruje i limity porovnávání profilů těkavých látek ve více než několika málo záznamech.



Obr. 37 Přeložené chromatogramy dvoudimenzionálního stanovení emisí těkavých látek z neošetřených vzorků dřeva

V rámci tohoto pokusu bylo uvedenou technikou proměřeno 45 vzorků. Výsledná matice dat (vzorky x proměnné) čítala 45 x 742 hodnot – pro zpracování takového datasetu je využití chemometrických metod nezbytné.

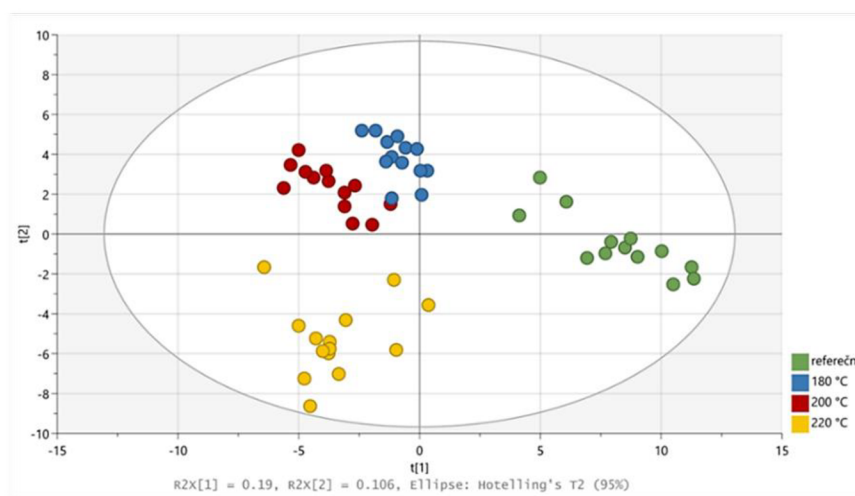
Prvotní zobrazení pomocí PCA ukazuje rozložení vzorků v prostoru dle prvních dvou component – vzorky dřeva termicky ošetřené a vzorky neošetřené referenční (Obr. 38). PCA vysvětluje 56 % variability mezi daty. Použití barev je zde pouze pro lepší vizualizaci ošetřených vzorků dřeva. Je patrné, že body reprezentující vzorky termálně ošetřené mají tendenci tvořit jeden shluk, zatímco vzorky identických druhů dřeva – ale neošetřené – vytváří víceméně samostatný cluster. Vzhledem ke značné různorodosti druhů testovaného dřeva zůstávají i odlehlé vzorky součástí statistického zpracování.



Obr. 38 PCA graf komponentního skóre: zobrazení termicky ne/ošetřených vzorků dřeva

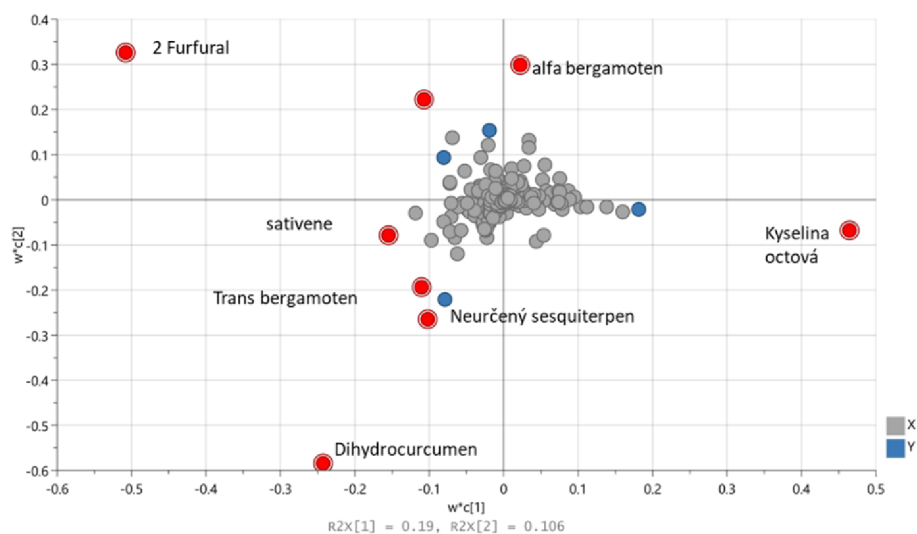
Toto zjištění koresponduje s tvrzením Peters *et al.* (2008), jenž poukazuje na značnou různorodost individuálních druhů dřevin v surové podobě, kdy je emise VOCs u tvrdých listnatých dřevin tvořena především aldehydy (pentanal, hexanal, furfural) a kyselinou octovou, zatímco u jehličnanů převládají mono-, di- a sesquiterpeny. Kyselina octová je pak také hlavním markerem vznikajícím jako produkt degradace hemicelulóz v procesu termální modifikace.

Následující PLS-DA model, ($R^2X_{cum} = 45 \%$, $R^2Y = 84 \%$, $Q^2_{cum} = 65 \%$) dokázal rozdělit skupiny dle teploty ošetření (Obr. 39).



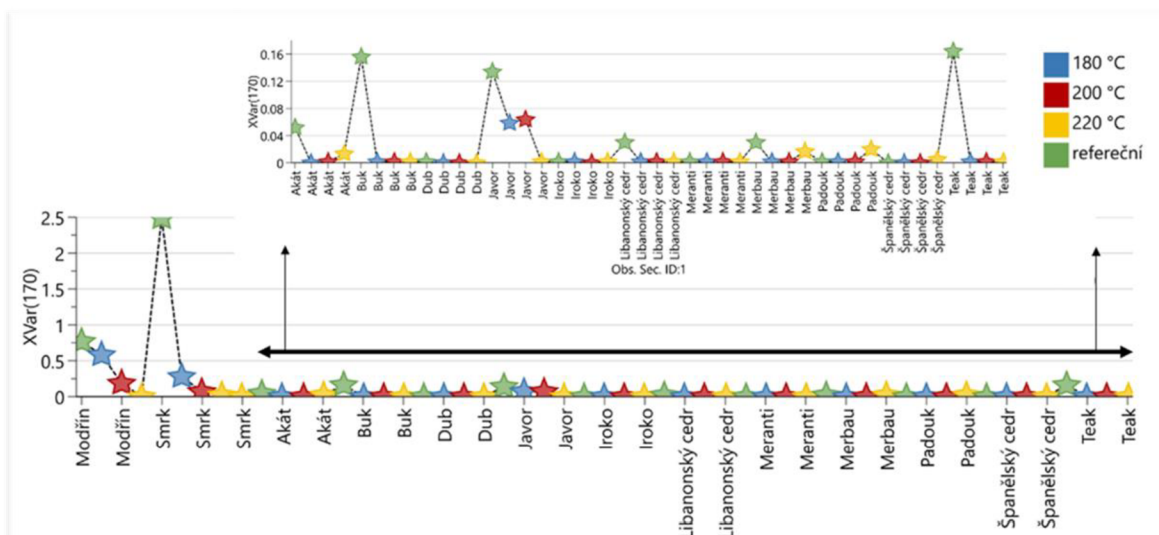
Obr. 39 PLS-DA graf komponentního skóre – dělení vzorků termovaného dřeva dle teploty ošetření

K němu příslušný graf vlivů (**Obr. 40**) ukazuje, které proměnné mají největší vliv pro rozdělení vzorků (krom přidaných umělých proměnných v procesu PLS-DA analýzy).



Obr. 40 PLS-DA graf vlivů; identifikovány nejvýznamnější sloučeniny pro separaci termovaného dřeva

Variable line plot (**Obr. 41**) pro α -pinen – nejběžnější terpenickou látku v jehličnanech – ukazuje, jak se zastoupení této látky snižuje se zvyšující se teplotou termické úpravy. Tento jev je v souladu se zjištěními Kačika *et al.* (2012), který poukazuje na dramatické snížení emise α -pinenu v případě konstrukčního jedlového dřeva (*Abies alba*) se zvyšující se teplotou termální úpravy, a to až k LOD v případě teploty 120 °C, zatímco McDonald and Wastney (1995) naopak pozorovali u borovice téměř o 60–70 % vyšší emise těkavých látek při teplotě 140 °C než při teplotě 120 °C.

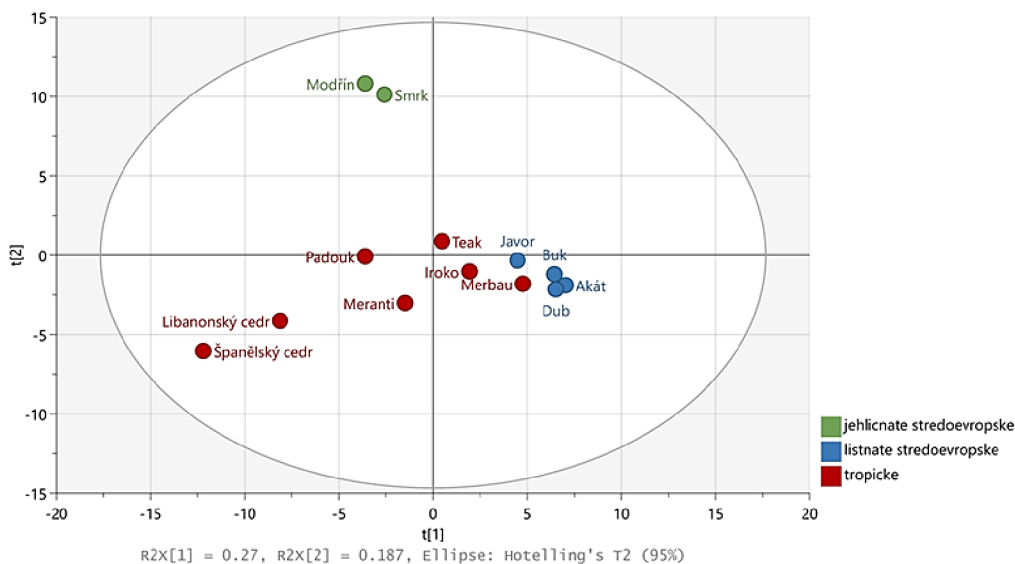


Obr. 41 Zastoupení α -pinenu u termicky modifikovaného dřeva

Největší pokles α -pinenu byl zaregistrován u smrku, kde byla současně největší počáteční odezva (v neošetřeném dřevu). Tato zjištění korespondují se zjištěními Hyttinenem *et al.* (2010), který kvantifikuje pokles emise TVOC termicky

modifikovaného smrku z $220 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ na $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ během 28 dní s nejvyšším zastoupením kyseliny octové, furfuralu a α -pinenu. Jak je evidentní na výřezu grafu, u ostatních druhů dřev není α -pinen tak výrazně zastoupený a v průběhu termické úpravy jeho zastoupení v mnoha případech dokonce klesá až na LOD použité instrumentace. Zajímavý je výskyt α -pinenu v případě referenčního vzorku javoru a buku, zatímco u dubu je emise na hranici LOD. Jeho přítomnost však také klesá v průběhu termální modifikace, kdy se terpeny částečně odpaří a částečně degradují (McGraw *et al.*, 1999). V souladu se zjištěním Peters *et al.* (2008) klesá v případě smrku emise α -pinenu při teplotě ošetření 180°C dokonce na $1/5$ emise referenčního vzorku, nicméně při zvýšení teplot na 200°C a 220°C už setrvává na obdobné úrovni.

Pokud se pro zajímavost zaměříme pouze na skupinu vzorků neošetřených, zjistíme v této skupině prostřednictvím PCA (**Obr. 42**) separaci jehličnatých dřev od všech ostatních s tím, že je patrná tendence shlukování také mezi tropickými dřevinami a původními listnatými dřevinami.

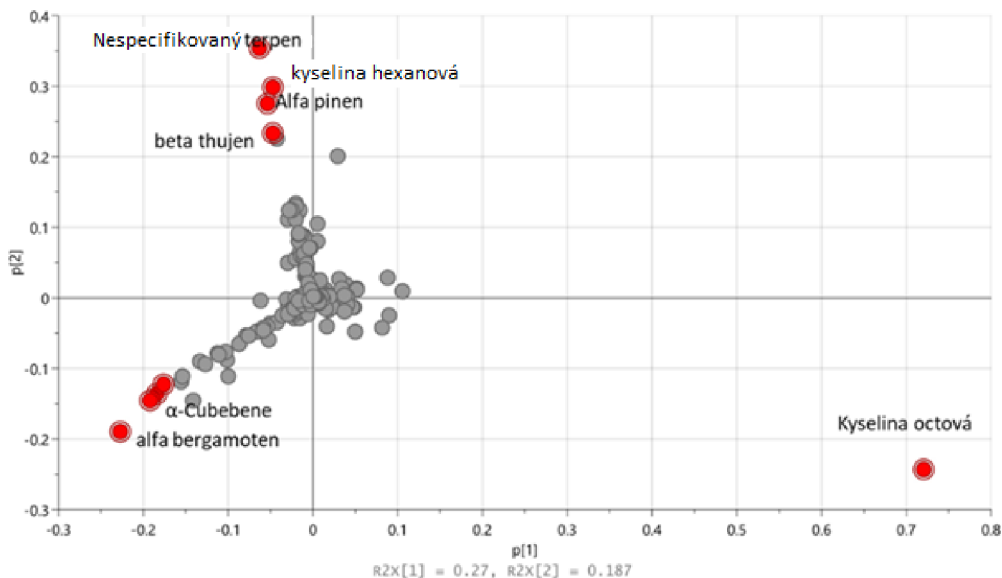


Obr. 42 PCA graf komponentního skóre: neošetřené vzorky dřeva

Nejvýznamnější sloučeniny způsobující tento jev jsou identifikovány v příslušném loading plotu (**Obr. 43**). Kyselina octová stojí za separací původních listnatých dřev, zatímco terpenické látky vyčleňují skupinu jehličnanů. Thujen je monoterpen přítomný v esenciálních rostlinných olejích, jemuž v literatuře není věnováno mnoho pozornosti. Jeho výskyt je zpravidla provázán s rostlinou kadidlovníku (*Boswellia serrata*). Rostliny obsahující thujen používají v tradiční medicíně k léčbě různých onemocnění, astmatu, stresu, a mají antimikrobiální, protizánětlivý účinek. Bylo také zjištěno, že thujen může být účinný repelent.

Zvýšená přítomnost α -bergamotenu a α -cubebenu je charakteristická pro cedrové dřevo. Alfa-bergamoten se řadí mezi monoterpenoidy. Člověkem je vnímán jako látka s dřevitou vůní, nicméně studii jeho charakteristik nebylo věnováno mnoho pozornosti

(HMDB, 2022). V cedru je pravděpodobně jeho přítomnost spojena s příjemnou sladkou vůní. Právě z důvodu obsahu silic bylo dřevo cedru tradičně používáno jako vykuřovadlo a pro rituální účely; vyráběly se z něj sloupy, podlahy, obklady stěn, skříně a sarkofágy. Olej a pryskyřice mají konzervační účinek (Renoux, 2021).



Obr. 43 PCA graf vlivů; identifikovány nejvýznamnější sloučeniny pro separaci

Přestože termálně modifikované dřevo vykazuje značně nižší emise terpenů, je u něj naopak v případě porovnání se dřevem bez modifikace pozorována vyšší emise kyseliny octové (Mayes and Oksanen, 2002). Zajímavé zjištění učinil Nuopponen *et al.* (2003). Ten tvrdí, že volatilní extraktiva – pryskyřičné kyseliny se při termální modifikace v rozpětí 100-180 °C vyskytovaly ve středové části vzorků dřeva, nicméně při zahřátí na 200 °C migrovaly ze středové části vzorku blíže k jeho povrchu a při zvýšení teploty nad 200 °C pak pryskyřičné kyseliny nebyly detekovány vůbec. Tento jev se přímo projevil na emisi VOCs, kde došlo ke změně profilu látek. Volatilní terpenoidy byly inhibovány, zatímco emise kyseliny octové, furancarboxaldehydu a 2-propanonu vzrostly (Manninen *et al.*, 2002). Dřevo při zahřátí na 180 °C vykazuje snížení emise terpenů a v profilu VOCs dominují furfural, hexanal a kyselina octová; při zahřátí na 230 °C převládá kyselina octová. Tím se teoreticky termicky upravené dřevo řadí do skupiny materiálů, které splňují testy ekotoxicity (Hill, 2006).

Zásadní je provázanost s aktuálními poznatky v oblasti léčby rakoviny za pomoci esenciálních olejů. Rozsáhlé review v tomto směru prezentoval Sharma *et al.* (2022), který poukazuje na účinek esenciálních olejů (obsahujících mimo jiné terpeny) v léčení rakoviny. Esence jedle korejské (*Abies koreana*) a jedle bělokoré (*Abies alba*) s hlavními složkami α -, β -pinenem, limonenem, kamfenem a β -myrcenem prokázaly cytotoxický efekt při léčbě rakoviny prsu a rakoviny plic. Látky z již zmíněného cedru libanonského (*Cedrus libani*) pak mohou být účinné při léčbě onemocnění leukémií a akutní leukémií.

7 Závěr

Práce shrnuje aktuální poznatky v oblasti emise těkavých látek z materiálů používaných nebo aplikovatelných v oblasti dřevostaveb. V literárním přehledu představuje tuto problematiku i s přesahem do oblasti zdravotních rizik emisí těkavých látek pro obyvatele a metod stanovení těkavých látek.

Práce je rozdělena do 4 okruhů experimentálního stanovení, a to s ohledem na oblast aplikace materiálu v dřevostavbách; materiály konstrukční, konopí jako víceúčelový materiál, materiály izolační a dřevo pro všestranné použití.

Dosažené výsledky jsou shrnuty do následujících bodů:

- 1) V rámci realizovaného výzkumu byly k monitoringu emise těkavých látek z materiálů pro dřevostavby aplikovány sorpční techniky spojené s plynovou chromatografií a hmotnostní spektrometrií, kterými byly stanoveny těkavé látky ve vzduchu nad vzorkem. Výsledky byly řešeny jednak jako výstupy cílených analýz se zaměřením na konkrétní vybrané látky zvolené na základě literárního rozboru – zejména terpeny a aldehydy; a zároveň pomocí necílového přístupu. V takovém případě byly z celého změřeného profilu látek identifikovány látky nejvíce zodpovědné za popsané vlastnosti vzorků, např. furfural v případě modifikovaného konopného pazdeří.
- 2) V emisích izolačních materiálů byly zjištěny zejména látky mající vztah k surovinám, ze kterých je materiál vyroben. Alternativní materiály na bázi lignocelulózy mají vyšší emise terpenických látek a aldehydů, zatímco konvenční materiály mají vyšší emise látek syntetických – reziduí jejich výroby – zpravidla deriváty benzenu. Tyto látky nebyly z přírodních materiálů emitovány. Materiály na bázi silikátů měly nejmenší emise monitorovaných látek.
- 3) Vybrané materiály přírodního původu byly dále modifikovány s cílem snížení emise VOCs. Získaná data byla kvalitativně vyhodnocena a byly popsány rozdíly mezi různě ošetřenými materiály. V případě konstrukční OSB bylo prokázáno, že ošetření kyselinami a odvětrávání desky při skladování vedlo ke snížení odezvy aldehydů i dalších VOCs (emise se snížila max. 10krát). Opačný jev byl pozorován u konopného pazdeří; nicméně vliv na emise jednotlivých látek se liší dle typu ošetření. Na některé cílové látky má vybraná chemická modifikace pozitivní efekt; např. emise kyseliny octové byla snížena použitím hydrogenuhličitanu sodného 4krát, zatímco při aplikaci kyselin se její emise i emise vybraných aldehydů zvýšila až 900krát.

V případě termické modifikace dřeva byl prokázán potenciál snížit emise VOCs. Odezvy terpenických sloučenin klesají s rostoucí intenzitou ošetření až na limit detekce. Na druhou stranu má termální úprava za výsledek zvýšení odezvy degradačních produktů ligninu.

Vlastní zhodnocení:

Vedle výsledků prezentovaných v této práci je nutno uvážit, že chemické složení surovin používaných při výrobě stavebních materiálů představuje pouze jeden z faktorů ovlivňujících kvalitu vnitřního ovzduší ve stavbách na bázi dřeva a v budovách obecně. Z dalších faktorů je při celkovém posouzení vnitřního prostředí potřeba brát v úvahu chování stavebních materiálů v konstrukci, a tedy uvolňování těkavých organických sloučenin v nich obsažených. Emise látek do vnitřního prostředí dále ovlivňuje samotné konstrukční řešení stavby a kvalita odvedených stavebních prací. Z fyzikálních jevů mají vliv převládající tepelné a vlhkostní podmínky a rozdílnosti tlaku vzduchu procházejícího konstrukcí. Zásadní pro koncentrace látek, kterým jsou osoby uvnitř vystaveny, je objem vzduchu ve vnitřním prostoru budovy, poměr uvolňování monitorovaných látek a rychlost jejich odstraňování spolu s výměnou vzduchu při větrání, případně jejich reakce s přítomnými materiály. Z hlediska moderního stavebnictví jsou v současnosti kromě mechanických vlastností velmi důležité také např. tepelně-technické vlastnosti. U testovaných izolačních materiálů byla zdokumentována emise řady látek mající původ v použitých surovinách. Pro příklad byla ukázána emise benzaldehydu z těchto materiálů. Obecně nejnižších emisí všech sledovaných látek bylo dosaženo u materiálů na bázi silikátů, nicméně jejich životní cyklus je natolik energeticky náročný, že je jejich použití v šetrném stavebnictvím otázkou. Stavebník by měl vedle stavebně-konstrukčních vlastností uvážit i emise látek z použitých materiálů, aby právě volbou použitých materiálů vyhověl nejen normativním požadavkům, ale také požadavku zákazníka na udržitelnost a ekonomickou náročnost provedení stavby.

8 Přínos pro vědu a praxi

Výsledky výzkumu byly publikovány ve vědeckých časopisech a prezentovány na několika konferencích.

Téma této disertační práce je velmi aktuální, a to s ohledem na rostoucí časovou dotaci, během níž se lidé vyskytují ve vnitřním prostředí budov. S ohledem na zvyšující se požadavky na snižování energetické náročnosti budov, jichž lze dosáhnout zateplováním budov a omezením přímého větrání, však roste přirozeně koncentrace VOCs v interiéru. Tyto látky jsou dlouhodobě emitovány z různých zdrojů. Z hlediska vědeckého bádání je proto zásadní hledat a dále zkoumat materiály, které mají pozitivní dopad na zdraví člověka, jsou obnovitelné, a tedy mohou naplňovat principy udržitelnosti. S ohledem na riziko ubývání lesních ploch, ať už v důsledku biotických a abiotických činitelů či antropogenních vlivů je pak nutné poohlížet se ve výrobní oblasti dřevostaveb po materiálech, které, ať už v surové podobě nebo jako plošné, mohou dřevo, a především konvenčně používané materiály na bázi plastů a silikátů, alternovat. Často tento krok může znamenat návrat k materiálům tradičním ve starých kulturách.

Z výše uvedených tezí vyplývají následující doporučení pro vědu:

- 1) Je doporučeno dále zkoumat lignocelulóзовé materiály, které představují ekologicky šetrnější cestu ve srovnání s tradičními stavebními materiály na bázi oceli nebo silikátů tak, aby jejich použití vedlo ke zlepšení ekologické rovnováhy budov nejen během výstavby, ale také v průběhu celého jejich životního cyklu.
- 2) Je vhodné blíže zkoumat vliv interakce dezintegrovaných lignocelulóзовých vláken a aditiv (lepidla, plnidla, separátory apod.) na emisi VOCs s ohledem na možnost výroby alternativních plošných materiálů.
- 3) Na bázi dílčí úspěšnosti realizovaných modifikací vybraných materiálů je stěžejní rozšířit oblast aplikovaných modifikací a hledat dále postupy k cílenému snižování emisí VOCs z těchto materiálů.

V oblasti stavebních materiálů jsou výrobci často konfrontováni s normativními postupy a požadavky kladenými na uvádění materiálů na trh. Tyto certifikované zkoušky (např. dle ISO 16000) jsou zpravidla časově i finančně náročné a vyžadují spoluúčast akreditovaných laboratoří včetně nákladného laboratorního vybavení, např. velkoobjemových zkušebních komor, které v České republice není běžně dostupné. Tato disertační práce poukazuje na význam HS-SPME jako rychlé a svým způsobem také levné techniky, pro analýzu emisí z pevných materiálů, přičemž jsou těkavé látky emitovány do prostoru nad vzorkem.

Z této myšlenky vyplývají následující doporučení pro praxi:

- 1) Pro provozní testy v lokálních laboratořích výrobců materiálů je vhodné využít metodu HS-SPME k ověření emise VOCs z produkovaných materiálů. Tato testování je možné realizovat při provázanosti výrobních společností s univerzitními laboratořemi.
- 2) Termicky modifikované dřevo může bez další nutné povrchové úpravy sloužit pro výrobu nábytku a interiérového vybavení s nízkou emisí VOCs. V tomto ohledu je však nutné uvažovat také finanční náročnost jeho přípravy, promítající se do finální ceny produktu.
- 3) Testované alternativní lignocelulózní materiály mají z hlediska tepelných vlastností předpoklady pro běžné použití ve stavebnictví. Na vývoji plošných materiálů je třeba pracovat. Zásadní je v tomto směru také provázanost se zemědělským sektorem s ohledem na dostatek vstupní suroviny.
- 4) Přírodní vlákna lze využít jako alternativu dřeva v pokročilých kompozitních materiálech stran jejich mechanických vlastností. Pro zpracování do desek by měly být vždy prioritně testovány na množství emise VOCs s cílem předpovědět vliv finálního průmyslového produktu na kvalitu vnitřního ovzduší.

Spolupráce a návaznosti

V rámci doktorského studia proběhlo zapojení studentky do těchto projektů probíhajících na Fakultě lesnické a dřevařské ČZU:

- Projekt OP PPR CZ.07.1.02/0.0/0.0/16_023/0000111 Rozšíření a podpora transferu technologií a znalostí ČZU realizací aktivit „proof-of-concept“ Aktivita KZ6 (Operační program Praha – pól růstu ČR) – Vývoj konstrukčního řešení předsazené stěny na bázi obnovitelných surovin pro stavby s téměř nulovou spotřebou energie
Pozice: odborný vědecký pracovník
- Projekt TAČR TH02020792 (Technologická agentura České republiky) – Vývoj metodiky stanovení tepelně-optimalizovaných parametrů obytných dřevěných stavebních konstrukcí z pohledu kvality vnitřního prostředí, snížení energetické náročnosti a environmentálních faktorů budov v návaznosti na snížení skleníkových plynů
Pozice: odborný pracovník technik
- Excelentní výzkum jako podpora adaptace lesnictví a dřevařství na globální změnu a 4. průmyslovou revoluci na ČZU v Praze OP VVV CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000803
Pozice: člen pracovní skupiny projektu P3 PP9, technik/doktorand

Seznam publikovaných článků

- Adamová, T.; Hradecký, J.; Pánek, M. Volatile Organic Compounds (VOCs) from Wood and Wood-Based Panels: Methods for Evaluation, Potential Health Risks, and Mitigation. *Polymers* **2020**, *12*, 2289, doi: 10.3390/polym12102289.
- Adamová, T.; Hradecký, J.; Prajer, M. VOC Emissions from Spruce Strands and Hemp Shive: In Search for a Low Emission Raw Material for Bio-Based Construction Materials. *Materials* **2019**, *12*, 2026, doi: 10.3390/ma12122026.
- Pavelek, M.; Adamová, T. Bio-Waste Thermal Insulation Panel for Sustainable Building Construction in Steady and Unsteady-State Conditions. *Materials* **2019**, *12*, 2004, doi: 10.3390/ma12122004.

Publikovaná skripta

- Gaff, M.; Trgala, K.; Adamová, T. *Environmental Benefits of Using Recycled Wood in the Production of Wood-Based Panels*, 1. vyd.; ČZU: Praha, Česká republika, 2018; pp. 1–51. ISBN 978-80-213-2852-5.

Realizované studie

- Adamová, T.; Trgala, K. *Rešerše a návrh metodiky k projektu snižování emisí VOC látek z OSB desek*. ČZU: Praha, Česká republika, 2018.
- Adamová, T.; Trgala, K. *Projekt snižování emisí VOC látek z OSB desek*. ČZU: Praha, Česká republika, 2018.

Certifikovaná metodika

- Pavelek, M. – **Pohloudek, J. – **Holub, J. – **Šenfelder, P. – **Svatoš, J. – **Pospíšil, T. – Adamová, T. – Trgala, K. – Šedivka, P. *Metodika měření tepelně-technických parametrů u obytných dřevěných stavebních konstrukcí, Methodology of measurement of thermo-technical parameters of residential wooden building structures*, Wood; building structures; thermal parameters, 2019, XX - Nepřirazeno, š, TH02020792-2019V002, Cílem metodiky je vypracování vhodných metodických postupů měření tepelných vlastností u obvodových konstrukcí ve formě panelů na bázi dřeva. Licenční smlouva je uzavřena se společností RD Rýmařov, a.s. RD Rýmařov s. r. o., 8. května 1191/45, 795 01 Rýmařov, www.rdrymarov.cz, +420 602 154 344, Úspory plynoucí z úspor tepelně-izolačních materiálů použitých při výstavbě, úspory energií plynoucí díky optimalizaci tloušťky a materiálové skladby obvodového pláště a tepelné energie potřebné pro vytápění anebo klimatizaci, zvýšení standardu a komfortu bydlení z hlediska optimalizace tepelně-technických parametrů konstrukcí obvodových plášťů obytných budov na bázi dřeva, Optimalizace vnitřního prostředí v interiéru pro omezení vzniku plísní a houbového napadení, díky čemuž dojde ke snížení potenciálního rizika negativních vlivů prostředí v interiérech na lidské zdraví (omezení výskytu respiračních onemocnění a astmatu) a na napadení konstrukce biotickými činiteli (plísně, spóry hub)., A - Výsledek využívá pouze poskytovatel, QUALIFORM, a.s., Mlaty 672/8, 642 00 Brno - odbor posuzování shody č.1381, 31.10.2019.

Technicky realizované výsledky

- Šedivka, P. – **Pohloudek, I. – **Holub, Ph.D., p. – **Šenfelder, Dis., BA, B. – **Svatoš, Ph.D., I. – **Pospíšil, I. – Pavelek, M. – Adamová, T. *Funkční vzorek konstrukce obvodového pláště, Functional sample of cladding construction*, Wooden building; temperature; humidity, 2019, XX - Nepřirazeno, B - Funkční vzorek, TH02020792-2019V005, TH02020792-2019V005, Funkční vzorek konstrukce obvodového pláště dřevostaveb. Výsledek je licencován firmě RD Rýmařov s.r.o., IČ 18953581, 17.12.2019, Bc. Petr Šenfelder, DiS, BA., 8. května 1191/45, 795 01 Rýmařov, tel.: +420 602 154 344, email: senfeldr@rdrymarov.cz, Funkční vzorek může zvýšit obrát prodeje dřevostaveb segmentu difúzně uzavřené sloupkové konstrukce výrobce firmy DR Rýmařov s.r.o. o maximální výši 5%. , Česká zemědělská univerzita v Praze, 60460709, CZ - Česká republika, A - K využití výsledku jiným subjektem je vždy nutné nabytí licence, A - Povinné vždy, A - Výše vyčerpané části z celkových uznaných nákladů na dosažení výsledku je menší nebo rovna 5 mil. Kč.

Seznam literatury a použitých zdrojů

- 1 Adamová, T.; Hradecký, J.; Pánek, M. Volatile Organic Compounds (VOCs) from Wood and Wood-Based Panels: Methods for Evaluation, Potential Health Risks, and Mitigation. *Polymers* **2020**, *12*, 2289, doi:10.3390/polym12102289.
- 2 Adamová, T.; Hradecký, J.; Prajer, M. VOC Emissions from Spruce Strands and Hemp Shive: In Search for a Low Emission Raw Material for Bio-Based Construction Materials. *Materials* **2019**, *12*, 2026, doi:10.3390/ma12122026.
- 3 Adams, R.P. *Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry*, 4. vyd.; Allured: Carol Stream, IL, USA, 2007; ISBN-13 978-1-932633-21-4.
- 4 Addis, B.; Talbot, R. *Sustainable construction procurement: a guide to delivering environmentally responsible projects*. 1. vyd.; CIRIA: Londýn, Velká Británie, 2021; ISBN 9780860175711.
- 5 Alavez-Ramirez, A.; Chiñas-Castillo, F.; Morales-Dominguez, V.J.; Ortiz-Guzman, M. Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels. *Construction and Building Materials* **2012**, *37*, 425-431.
- 6 An, J.-Y.; Kim, S.; Kim, H.-J. Formaldehyde and TVOC emission behavior of laminate flooring by structure of laminate flooring and heating condition. *J. Hazard. Mater.* **2011**, *187*, 44-51, doi:10.1016/j.jhazmat.2010.08.086.
- 7 Andreovský, J.; Henelová, V. (ed.). *Příručka ochrany kvality ovzduší*. 1. vyd.; Sdružení společností IREAS centrum: Praha, Česká republika, 2013; ISBN 978-80-86832-77-7.
- 8 Api, A.M.; Belsito, D.; Bhatia, S.; Bruze, M.; Calow, P.; Dagli, M.L.; Dekant, W.; Fryer, A.D.; Kromidas, L.; La Cava, S. *et al.* RIFM fragrance ingredient safety assessment, 2-methyl-3-buten-2-ol, CAS Registry Number 115-18-4. *Food Chem. Toxicol.* **2015**, *84*, 50-56, doi:10.1016/j.fct.2015.07.009.
- 9 Asdrubali, F.; D'Alessandro, F.; Schiavoni, S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Mater. Technol.* **2015**, *4*, 1-17, doi:10.1016/j.susmat.2015.05.002.
- 10 Ashmore, M.R.; Dimitroulopoulou, C. Personal exposure of children to air pollution. *Atmos. Environ.* **2009**, *43*, 128-141, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.024.
- 11 Azadi, P.; Malina, R.; Barrett, S.R.H.; Kraft, M. The evolution of the biofuel science. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* **2017**, *76*, 1479-1484.
- 12 Azmir, J.; Zaidul, I.S.M.; Rahman, M.M.; Sharif, K.M.; Mohamed, A.; Sahena, F.; Jahurul, M.H.A.; Ghafoor, K.; Norulaini, N.A.N.; Omar, A.K.M. Techniques for

- extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *J. Food Eng.* **2013**, *117*, 426-436, doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014.
- 13 Back, E. L. Pattern of parenchyma and canal resin composition in softwoods and hardwoods. *J. Wood Sci.* **2002**, *48*, 167-170.
 - 14 Bajer, T.; Šulc, J.; Ventura, K.; Bajerová, P. Volatile compounds fingerprinting of larch tree samples for Siberian and European larch distinction. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **2020**, *78*, 393-402, doi:10.1007/s00107-020-01498-w.
 - 15 Baumann, M.G.D.; Batterman, S.A.; Zhang, G.-Z. Terpene emissions from particleboard and medium-density fiberboard products. *Forest Prod. J.* **1999**, *49*, 49–56.
 - 16 Benouadah, N.; Aliouche, D.; Pranovich, A.; Willför, S. Chemical characterization of *Pinus halepensis* sapwood and heartwood, *Wood Mater. Sci. Eng.* **2019**, *14*, 157-164, doi:10.1080/17480272.2018.1448436.
 - 17 Benouadah, N.; Pranovich, A.; Aliouche, D.; Hemming, J.; Smeds, A.; Willför, S. Analysis of extractives from *Pinus halepensis* and *Eucalyptus camaldulensis* as predominant trees in Algeria, *Holzforschung* **2018**, *72*, 97-104, doi:10.1515/hf-2017-0098.
 - 18 Berardi, U.; Naldi, M. The impact of the temperature dependent thermal conductivity of insulating materials on the effective building envelope performance. *Energy Build.* **2017**, *144*, 262-275. doi:10.1016/j.enbuild.2017.03.052.
 - 19 Berge, B. *The ecology of building materials*. 2. vyd., Architectural Press: Oxford, Velká Británie, 2009; ISBN 978-1-85617-537-1.
 - 20 Bertaud, F.; Crampon, Ch.; Badens., E. Volatile terpene extraction of spruce, fir and maritime pine wood: Supercritical CO₂ extraction compared to classical solvent extractions and steam distillation. *Holzforschung* **2017**, *71*, 667-673, doi:10.1515/hf-2016-0197.
 - 21 Billionnet, C.; Gay, E.; Kirchner, S.; Leynaert, B.; Annesi-Maesano, I. Quantitative assessments of indoor air pollution and respiratory health in a population-based sample of French dwellings. *Environ. Res.* **2011**, *111*, 425-434, doi:10.1016/j.envres.2011.02.008.
 - 22 Binici, H.; Aksogan, O. Eco-friendly insulation material production with waste olive seeds, ground PVC and wood chips. *J. Build. Eng.* **2016**, *5*, 260-266, doi:10.1016/j.job.2016.01.008.
 - 23 Binici, H.; Eken, M.; Dolaz, M.; Aksogan, O.; Kara, M. An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibres. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *51*, 24-33.

- 24 Böhm, M.; Reisner, J.; Bomba, J. *Materiály na bázi dřeva*. 1. vyd. Fakulta lesnická a dřevařská, Česká zemědělská univerzita v Praze: Praha, Česká republika, 2012a; ISBN 978-80-213-2251-6.
- 25 Böhm, M.; Salem, M.Z.; Srba, J. Formaldehyde emission monitoring from a variety of solid wood, plywood, blockboard and flooring products manufactured for building and furnishing materials. *J. Hazard. Mater.* **2012b**, *221*, 68–79.
- 26 Bouchonnet, S. *Introduction to GC-MS coupling*. 1. vyd.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2013; ISBN 978-1-4665-7251-5.
- 27 Brischke, Ch.; Hanske, M. Durability of untreated and thermally modified reed (*Phragmites australis*) against brown, white and soft rot causing fungi. *Ind. Crops Prod.* **2016**, *91*, 49-55.
- 28 Brown, S.K. Occurrence of volatile organic compounds in indoor air. In *Organic Indoor Air Pollutants: Occurrence and Measurement and Evaluation*, 1. vyd.; Salthammer, T.; Wiley-VCH: Weinheim, 1999; s. 171-184, ISBN-13 978-3527296224.
- 29 Brzyski, P.; Barnat-Hunek, D.; Suchorab, Z.; Łagód, G. Composite materials based on hemp and flax for low-energy buildings. *Materials* **2017**, *10*, 510, doi:10.3390/ma10050510.
- 30 Brzyski, P.; Łagód, G. Physical and mechanical properties of composites based on hemp shiv and lime. In *SOLINA 2018 - VII Conference SOLINA Sustainable Development: Architecture - Building Construction - Environmental Engineering and Protection Innovative Energy-Efficient Technologies - Utilization of Renewable Energy Sources, Proceedings of a meeting SOLINA 2018*, Polanczyk, Polsko, 19-23 červen 2018; Licholai, L. et al.; EDP Sciences, 2018; 49, 00010.
- 31 Cakmak, S.; Dales, R.E.; Liu, L.; Kauri, L.M.; Lemieux, CH.L.; Hebborn, CH., Zhu, J. Residential exposure to volatile organic compounds and lung function: Results from a population-based cross-sectional survey. *Environ. Pollut.* **2014**, *194*, 145-151, doi:10.1016/j.envpol.2014.07.020.
- 32 Candelier, K.; Dumarc, S.; Pétrissans, A.; Pétrissans, M.; Kamdem, P.; Gérardin, P. Thermodesorption coupled to GC–MS to characterize volatiles formation kinetic during wood thermodegradation. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **2013**, *101*, 96-102, doi:10.1016/j.jaap.2013.02.006.
- 33 Carré, P.; Pouzet, A. Rapeseed market, worldwide and in Europe. *Oilseeds fats Crops Lipids* **2014**, *21*, D102, doi: 10.1051/ocf/2013054.
- 34 Carvalho, L.H.; Magalhães, F.D.; João, F. Formaldehyde emissions from wood-based panels: Testing methods and industrial perspectives. In *Formaldehyde: Chemistry,*

- Applications and Role In Polymerization*. Nova Science Publishers: Hauppauge, NY, 2012; s. 73-108.
- 35 Cecchi, T. Head Space—Solid Phase Micro Extraction Profile of Volatile Organic Compounds Emitted from Parquet Samples. *J. Wood Chem. Technol.* **2014**, *34*, 211-224, doi:10.1080/02773813.2013.861849.
 - 36 Cetera, P.; Russo, D.; Milell, L.; Todaro, L. Thermo-treatment affects *Quercus cerris* L. wood properties and the antioxidant activity and chemical composition of its by-product extracts. *Ind. Crops Prod.* **2019**, *130*, 380-388.
 - 37 Çomak, B.; Bideci, A.; Bideci, Ö.S. Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *169*, 794–799, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.029.
 - 38 Cowan, M.M. Plant Products as Antimicrobial Agents. *Clin. Microbiol. Rev.* **1999**, *12*, 564-582, doi:10.1128/CMR.12.4.564.
 - 39 Czajka, M.; Fabisiak, B.; Fabisiak, E. Emission of Volatile Organic Compounds from Heartwood and Sapwood of Selected Coniferous Species. *Forests* **2020**, *11*, 92.
 - 40 Čech, P. 2008. *Vliv technologie, kompozitních materiálů a povrchové úpravy na emise VOC emitované nábytkem*. Disertační práce, Mendelova univerzita v Brně, Brno, Česká republika.
 - 41 D’Alessandro, F.; Bianchi, F.; Baldinelli, G.; Rotili, A.; Schiavoni, S. Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance. *J. Build. Eng.* **2017**, *11*, 56-68.
 - 42 Da Silva, C.F.; Cheta, R.; Maskell, R.; Dengel, A.; Ansell, M.P.; Ball, R. Influence of eco-materials on indoor air quality. *Green Mater.* **2016**, *4*, 72-80, doi:10.1680/jgrma.16.00002.
 - 43 Da Silva, C.F.; Stefanowski, B.; Maskell, D.; Ormondroyd, G.A.; Ansell, M.P.; Dengel, A.C.; Ball, R.J. Improvement of indoor air quality by MDF panels containing walnut shells. *Build. Environ.* **2017**, *123*, 427–436.
 - 44 Däumling, C.; Wilke, O.; Horn, W.; Brenske, K.R.; Jann, O. Committee for Health-related Evaluation of Building Products. Health-related Evaluation Procedure for Volatile Organic Compounds Emissions (VOC and SVOC) from Building Products—A Contribution to the European Construction Products Directive. *Gefahrst. Reinhalt. Luft* **2005**, *65*, 90–92.
 - 45 Demirel, G.; Özden, Ö.; Dögerogly, T.; Gaga, E.O. Personal exposure of primary school children to BTEX, NO₂ and ozone in Eskisehir, Turkey: relationship with indoor/outdoor concentrations and risk assessment. *Sci. Total Environ.* **2014**, *473-474*, 537–548, doi:10.1016/j.scitotenv.2013.12.034.

- 46 De Meijer, M.; Militz, H. Wet adhesion of low-VOC coatings on wood: A quantitative analysis. *Prog. Org. Coat.* **2000**, *38*, 223-240, doi:10.1016/S0300-9440(00)00108-9.
- 47 Dix, B.; Roffael, E.; Schneider, T. *Abgabe von flüchtigen Verbindungen (Volatile Organic Compounds, VOC) von Strands, hergestellt aus Kern und Splintholz der Kiefer*. Short report. 6; Wilhelm-Klauditz-Institut: Braunschweig, Germany; 2004.
- 48 Donaldson, L.A.; Singh, A.; Raymond, L.; Hill, S.; Schmitt, U. Extractive distribution in *Pseudotsuga menziesii*: effects on cell wall porosity in sapwood and heartwood. *IAWA Journal* **2019**, *40*, 721-740, doi:10.1163/22941932-40190248.
- 49 Donatelli, A.; Cuna, D.; Tagliente, M.A.; Protopapa, M.L.; Mevoli, A.; Aversa, P.; Blasi, C.; Capodiceci, L.; Luprano, V.A.M.. Effect of treatments on the aging behaviour of hemp fibres for building construction in the Mediterranean Area. *J. Build. Eng.* **2017**, *11*, 37-47, doi:10.1016/j.job.2017.03.013.
- 50 Eichhorn, S.; Erfurt, S.; Hofmann, T.; Seegmüller, S.; Németh, R.; Hapla, F. Determination of the phenolic extractive content in sweet chestnut (*Castanea Sativa Mill.*) Wood. *Wood Research* **2017**, *62*, 181-196.
- 51 Englund, F.; Nussbaum, R.M. Monoterpenes in Scots Pine and Norway Spruce and their Emission during Kiln Drying. *Holzforschung*, **2000**, *54*, 449-456,
- 52 Ernstgård, L.; Iregren, A.; Sjögren, B.; Svedberg, U.; Johanson, G. Acute effects of exposure to hexanal vapors in humans. *J. Occup. Environ. Med.* **2006**, *48*, 573-580.
- 53 Eseyin, A. E.; Steele, P. H. An overview of the applications of furfural and its derivatives. *Int. J. Adv. Chem.* **2015**, *3*, 42-47.
- 54 Ewen, R.J.; Jones, P.R.H.; Ratcliffe, N.M.; Spencer-Phillips, P.T.N. Identification by gas chromatography-mass spectrometry of the volatile organic compounds emitted from the wood-rotting fungi *Serpula lacrymans* and *Coniophora puteana*, and from *Pinus sylvestris* timber. *Mycol. Res.* **2004**, *108*, 806-814, ISSN 0953-7562, doi:10.1017/S095375620400022X.
- 55 Fiore, V.; Scalici, T.; Nicoletti, F.; Vitale, G.; Prestipino, M.; Valenza, A. A new eco-friendly chemical treatment of natural fibres: Effect of sodium bicarbonate on properties of sisal fibre and its epoxy composites. *Compos. Part B Eng.* **2016**, *85*, 150-160.
- 56 Flores Péres, V.; Saffi, J.; Melecchi, M.I.S.; Abad, F.C.; de Assis Jacques, R.; Martinez, M.M.; Oliveira, E.C.; Caramão, E.B. Comparison of soxhlet, ultrasound-assisted and pressurized liquid extraction of terpenes, fatty acids and Vitamin E from *Piper gaudichaudianum* Kunth. *J. Chromatogr. A* **2006**, *1105*, 115-118, doi:10.1016/j.chroma.2005.07.113.

- 57 Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture data. In: *Analýza stavebních obvodových konstrukcí na bázi dřeva z hlediska tepelných vlastností*. Disertační práce, ČZU: Praha, Česká republika, 2019.
- 58 Forsthuber, B.; Ecker, M.; Truskaller, M.; Gröll, G. Rapid prediction of surface characteristics of European and Siberian larch wood by FT-NIRS. *Eur. J. Wood Prod.* **2016**, 75, 569-580, doi:10.1007/s00107-016-1112-4.
- 59 Fries, N. Nonanal as a growth factor for wood-rotting fungi. *Nature* **1960**, 187, 166-167.
- 60 Gaff, M.; Trgala, K.; Adamová, T. *Environmental Benefits of Using Recycled Wood in the Production of Wood-Based Panels*, 1. vyd.; ČZU: Praha, Česká republika, 2018; ISBN 978-80-213-2852-5.
- 61 Gandelová, L.; Horáček, P.; Šlezingerová, J. *Nauka o dřevě*. 1. vyd.; Mendelova zemědělská a lesnická univerzita: Brno, Czech Republic, 2002. ISBN 80-7157-577-1.
- 62 Gérard, J.; Paradis, S.; Thibaut, B. Survey on the chemical composition of several tropical wood species. *Bois For. Trop.* **2019**, 342, 79-91.
- 63 Gierlinger, N.; Jacques, D.; Wimmer, R.; Pâques, L.E.; Schwanninger, M. Heartwood extractives and lignin content of different larch species (*Larix* sp.) and relationships to brown-rot decay-resistance. *Trees Struct. Funct.* **2004**, 18, 230-236, doi:10.1007/s00468-003-0300-0.
- 64 Gminski, R.; Marutzky, R.; Kevekordes, S.; Fuhrmann, F.; Bürger, W.; Hauschke, D.; Ebner, W.; Mersch-Sundermann, V. Can VOC emissions from pinewood and oriented strand boards (OSB) affect human health? A controlled human exposure study. In Proceedings of the 10th International Conference on Healthy Buildings, Brisbane, AUS, 8 - 12 July 2012; Curran: Red Hook, NY, USA 2013; Volume 1, s. 278-279; ISBN 978-1-62748-075-8.
- 65 Gminski, R.; Marutzky, R.; Kevekordes, S.; Fuhrmann, F.; Bürger, W.; Hauschke, D.; Ebner, W.; Mersch-Sundermann, V. Chemosensory irritations and pulmonary effects of acute exposure to emissions from oriented strand boards. *Hum. Exp. Toxicol.* **2011**, 30, 1204-1221, doi:10.1177/0960327110388537.
- 66 Granström, K. 2005. *Emissions of volatile organic compounds from wood*. Disertační práce, Karlstad University, Karlstad, Švédsko; ISBN 91-85335-46-0.
- 67 Gross, A.; Mocho, P.; Plaisance, H.; Cantau, C.; Kinadjian, N.; Yrieix, C.; Desauziers, V. Assessment of VOCs material/air exchanges of building products using the DOSEC®-SPME method. *Energy Procedia* **2017**, 122, 367-372.

- 68 Guenther, A.; Hewitt, C.N.; Erickson, D.; Fall, R.; Geron, C. A global model of natural volatile organic compound emissions. *J. Geophys. Res.* **1995**, *100*, 8873-8892, doi:10.1029/94JD02950.
- 69 Gupta, M.; Yang, J.; Roy, Ch. Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles☆. *Fuel* **2003**, *82*, 919-927, doi:10.1016/S0016-2361(02)00398-8.
- 70 Hafizoglu, H.; Holmbom, B. Chemical composition of extractives from *Abies nordmanniana*. *Holz Roh-Werkst.* **1995**, *53*, 273-275, doi:10.1007/s001070050088.
- 71 Hajar, L.; François, L.; Khater, C.; Jomaa, I.; Déqué, M.; Cheddadi, R. *Cedrus libani* (A. Rich) distribution in Lebanon: Past, present and future. *C.R. Biol.* **2010**, *333*, 622-630, doi:10.1016/j.crvi.2010.05.003.
- 72 Handa, S.S.; Khanuja, S.P.S.; Longo, G.; Rakesh, D.D. *Extraction Technologies for Medicinal and Aromatic Plants*. International centre for science and high technology: Trieste, Itálie, 2008.
- 73 Havelková, H. 2017. *Využití recyklovaného dřeva ve výrobě dřevotřískových desek*. Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, Brno, Česká republika.
- 74 He, Y.L., Li, M.M., Wu, L.Y., Zhao, T.; Di, Y.; Huang, X.; Ding, X.-F.; Wu, K.-W.; Fan, M.; Zhu, L.-L. Enhanced Hypoxia-Inducible Factor (HIF)-1 α Stability Induced by 5-Hydroxymethyl-2-Furfural (5-HMF) Contributes to Protection against Hypoxia. *Mol. Med.* **2014**, *20*, 590–600, doi:10.2119/molmed.2014.00007.
- 75 He, Z.; Zhang, Y.; Wei, W. Formaldehyde and VOC emissions at different manufacturing stages of wood based panels. *Build. Environ.* **2012**, *47*, 197-204, doi:10.1016/j.buildenv.2011.07.023.
- 76 Hidalgo-Cordero, J.F.; García-Navarro, J. Review on the Traditional Uses and Potential of Totora (*Schoenoplectus Californicus*) as Construction Material. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2017**, *245*, 022068, doi:10.1088/1757-899X/245/2/022068.
- 77 Hidalgo-Cordero, J.F.; García-Ortuño, T.; García-Navarro, J. Comparison of binderless boards produced with different tissues of totora (*Schoenoplectus californicus* (C.A. Mey) Soják) stems. *J. Build. Eng.* **2020**, *27*, 100961, doi:10.1016/j.job.2019.100961.
- 78 Hill, C.; Norton, A.; and Kutnar, A. Environmental impacts of wood composites and legislative obligations. In: *Wood Composites*, 1. vyd.; Ansell, M.P.; Woodhead Publishing, Cambridge, Velká Británie, 2015; s. 309-332; ISBN-9781782424543.
- 79 Hill, C.A.S. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. Wiley-Blackwell: Chichester, Velká Británie, 2006; s. 25-30; ISBN: 0-470-02172-1.

- 80 Hiramatsu, Y.; Shida, S.; Miyazaki, Y. House dust mites and their sensitivity to wood oils and volatiles. *J. Wood Sci.* **2008**, *54*, 1-9, doi:10.1007/s10086-007-0921-9.
- 81 Hodgson, A.T. Volatile organic chemical emissions from structural insulated panel (SIP) materials and implications for indoor air quality. *Lawrence Berkeley Natl. Lab.* **2003**, 53768, 1–30.
- 82 Hodgson, A.T.; Beal, D.; McIlvaine, J.E.R. Sources of formaldehyde, other aldehydes and terpenes in a new manufactured house. *Indoor Air* **2002**, *12*, 235-242, doi:10.1034/j.1600-0668.2002.01129.x.
- 83 Hradecký, J. 2017. *Rychlé hmotnostně spektrometrické metody pro sledování nízkomolekulárních složek potravin*. Disertační práce, Vysoká škola chemicko-technologická, Praha, Česká republika.
- 84 Hse, Ch.-Y.; Kuo, M.-L. Influence of extractives on wood gluing and finishing – a review. *For. Prod. J.* **1988**, *38*, 52-56.
- 85 Huang, P.; Zeidler, A.; Chang, W.-S.; Ansell, M.P.; Chew, Y.M.J.; Shea, A. Specific heat capacity measurement of *Phyllostachys edulis* (*Moso bamboo*) by differential scanning calorimetry. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *125*, 821-831.
- 86 Huang, Y.; Zhang, Y.; Qi, Y.; Yu, Y.; Yu, W. Identification of odorous constituents of bamboo during thermal treatment. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *203*, 104–110, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.054.
- 87 Hübschmann, H.-J. *Handbook of GC-MS – Fundamentals and Applications*, 3. vyd.; Wiley-VCH: Weinheim, Německo, 2015; ISBN 978-3-527-33474-2.
- 88 Hudec, M.; Johanišová, B.; Mansbart, T. *Pasivní domy z přírodních materiálů*. 2. aktualiz. vyd., Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4243-4.
- 89 Hugues, T.; Steiger, L.; Weber, J. *Timber construction: details, products, case studies*. 1. vyd., Detail: Mnichov, Německo, 2008; ISBN 978-3764370329.
- 90 Hussain, A.; Calabria-Holley, J.; Lawrence, M.; Ansell, M.P.; Jiang, Y.; Schorr, D.; Blanchet, P. Development of novel building composites based on hemp and multi-functional silica matrix. *Compos. Part B Eng.* **2019**, *156*, 266-273, doi:10.1016/j.compositesb.2018.08.093.
- 91 Hussein, T.; Paasonen, P.; Kulmala, M. Activity pattern of a selected group of school occupants and their family members in Helsinki – Finland. *Sci. Total Environ.* **2012**, *425*, 289-292.
- 92 Hyttinen, M.; Masalin-Weižo, M.; Kalliokoski, P.; Pasanen, P. Comparison of VOC emissions between air-dried and heat-treated Norway spruce (*Picea abies*), Scots pine (*Pinus sylvestris*) and European aspen (*Populus tremula*) wood. *Atmos. Environ.* **2010**, *44*, 5028-5033, ISSN 1352-2310, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.07.018.“

- 93 Charca, S.; Noel, J.; Andia, D.; Guzman, A.; Renteros, C.; Tumialan, J. Assessment of Ichu fibres as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions. *Energy Build.* **2015**, *108*, 55-60.
- 94 Chen, H. *Biotechnology of Lignocellulose: Theory and Practice*, 1. vyd.; Chemical Industry Press: Peking, Čína, 2014; ISBN 978-94-007-6898-7.
- 95 Chen, Z.; Wang, H.; Wang, M.; Liu, L.; Wang, X. Investigation of cooling processes of molten slags to develop multilevel control method for cleaner production in mineral wool. *J. Cleaner Prod.* **2022**, *339*, 130548, doi:10.1016/j.jclepro.2022.130548.
- 96 Chikhi, M.; Agoudjil, B.; Boudenn, A.; Gherabli, A. Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy Build.* **2013**, *66*, 267-273.
- 97 Chow, S.; Mukai, H. N. Effect of thermal degradation of cellulose on wood – polymer bonding. *Wood Sci.* **1972**, *4*, 202-208.
- 98 International Agency for Research on Cancer. Formaldehyde, 2-butoxyethanol and 1-tertbutoxypropan-2-ol. *IARC Monogr. Eval. Carcinog. Risks Hum.* **2006**, *88*, 1-478.
- 99 Ioannidis, K.; Melliou, E.; Magiatis, P. High-Throughput 1H-Nuclear Magnetic Resonance-Based Screening for the Identification and Quantification of Heartwood Diterpenic Acids in Four Black Pine (*Pinus nigra* Arn.) Marginal Provenances in Greece. *Molecules* **2019**, *24*, 3603, doi:10.3390/molecules24193603.
- 100 Irle, M.; Barbu, M.C. Wood based Panel Technology. In *Wood based Panels: An Introduction for Specialists*, 1. vyd.; Thoemen, H., Irle, M., Sernek, M. Eds; Brunel University Press: Londýn, Velká Británie, 2010; s. 1-55; ISBN 978-1-902316-82-6.
- 101 Janík, Z. Vysoké nároky na izolaci šikmých střech vyžadují nová řešení. *Topenářství instalace*, **2008**, *1*, 12-13.
- 102 Jain, R.B. Distributions of selected urinary metabolites of volatile organic compounds by age, gender, race/ethnicity, and smoking status in a representative sample of U.S. adults. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* **2015**, *40*, 471-479, doi:10.1016/j.etap.2015.07.018.
- 103 Jia, L.; Chu, J.; Li, J.; Ren, J.; Huang, P.; Li, D. Formaldehyde and VOC emissions from plywood panels bonded with bio-oil phenolic resins. *Environ. Pollut.* **2020**, *264*, doi:10.1016/j.envpol.2020.114819.
- 104 Jiang, C.; Li, D.; Zhang, P.; Li, J.; Wuang, J.; Yu, J. Formaldehyde and volatile organic compound (VOC) emissions from particleboard: Identification of odorous compounds and effects of heat treatment. *Build. Environ.* **2017**, *117*, 118–126.

- 105 Jiang, Y.; Lawrence, M.; Ansell, M. P.; Hussain, A. Cell wall microstructure, pore size distribution and absolute density of hemp shiv. *R. Soc. Open Sci.* **2018**, *5*, 171945, doi:10.1098/rsos.171945.
- 106 Johansson, I.; Karlsson, T.; Wimmerstedt, R. Volatile organic compound emissions when drying wood particles at high dewpoints. *Chin. J. Chem. Eng.* **2004**, *12*, 767-772.
- 107 Joshi, S.M. The sick building syndrome. *Indian J. Occup. Environ. Med.* **2008**, *12*, 61-64, doi:10.4103/0019-5278.43262.
- 108 Kačík, F.; Veľková, V.; Šmíra, P.; Nasswetrová, A.; Kačíková, D.; Reinprecht, L. Release of Terpenes from Fir Wood during Its Long-Term Use and in Thermal Treatment. *Molecules* **2012**, *17*, 9990-9999, doi:10.3390/molecules17089990.
- 109 Kačíková, D.; Kačík, F. *Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave*. 1. vyd.; Technická univerzita vo Zvolene: Zvolen, Slovensko, 2011; ISBN 978-80-228-2249-7.
- 110 Kačíková, D.; Kubovský, I.; Gaff, M.; Kačík, F. Changes of Meranti, Padauk, and Merbau Wood Lignin during the ThermoWood Process. *Polymers* **2021**, *13*, 993, doi:10.3390/polym13070993.
- 111 Kadir, R.; Hale, M.D. Antioxidant potential and content of phenolic compounds in extracts of twelve selected Malaysian commercial wood species. *Eur. J. Wood Prod.* **2017**, *75*, 615-622, doi:10.1007/s00107-016-1095-1.
- 112 Kamboj, G.; Gašparík, M.; Gaff, M.; Kačík, F.; Sethy, A.K.; Corleto, R.; Razaeei, F.; Ditommaso, G.; Sikora, A.; Kaplan, L.; *et al.* Surface quality and cutting power requirement after edge milling of thermally modified meranti (*Shorea* spp.) wood. *J. Build. Eng.* **2020**, *29*, 101213.
- 113 Kilic, A.; Altuntas, E. Wood and bark volatile compounds of *Laurus nobilis* L. *Holz Roh-Werkst.* **2006**, *64*, 317-320.
- 114 Kilic, A.; Niemz, P. Extractives in some tropical woods. *Eur. J. Wood Prod.* **2012**, *70*, 79-83, doi:10.1007/s00107-010-0489-8.
- 115 Kim, S. The reduction of formaldehyde and VOCs emission from wood based flooring by green adhesive using cashew nut shell liquid (CNSL). *J. of Hazard. Mater.* **2010**, *182*, 919-922, doi:10.1016/j.jhazmat.2010.03.003.
- 116 Kim, S. The reduction of indoor air pollutant from wood based composite by adding pozzolan for building materials. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 2319-2323, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.11.008.
- 117 Kim, S.; Kim, J.-A.; An, J.-Y.; Kim, H.-J.; Kim, S.D. and Park, J.C. TVOC and formaldehyde emission behaviors from flooring materials bonded with

- environmental-friendly MF/PVAc hybrid resins. *Indoor Air* **2007**, *17*, 404-415, doi:10.1111/j.1600-0668.2007.00488.x.
- 118 Kirkeskov, L.; Witterseh, T.; Funch, L.W.; Kristiansen, E.; Møhlhave, L.; Hansen, M.K.; Knudsen, B.B. Health evaluation of volatile organic compound (VOC) emission from exotic wood products. *Indoor Air* **2009**, *19*, 45.
- 119 Klepeis, N.E.; Nelson, W.C.; Ott, W.R.; Robinson, J.P.; Tsang, A.M.; Switzer, P.; Behar, J.V.; Hern, S.C.; Engelmann, W.H. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* **2001**, *11*, 231-252, doi:10.1038/sj.jea.7500165.
- 120 Koivula, M.; Kymäläinen, H.-R.; Virta, J.; Hakkarainen, H.; Hussein, T.; Komulainen, J.; Koponen, H.; Hautala, M.; Hämeri, K.; Kanerva, P.; *et al.* Emissions from thermal insulations—part 2: Evaluation of emissions from organic and inorganic insulations. *Build. Environ.* **2005**, *40*, 803–814, doi:10.1016/j.buildenv.2004.08.008.
- 121 Kolář, T.; Dobrovolný, P.; Szabó, P.; Mikita, T.; Kyncl, T.; Kyncl, J.; Sochová, I.; Rybníček, M. Wood species utilization for timber constructions in the Czech lands over the period 1400–1900. *Dendrochronologia* **2021**, *70*, 125900, doi:10.1016/j.dendro.2021.125900.
- 122 Katuščák, S. VOC. *Emisia prchavých organických látok z dreva a celulózových bio materiálov*. 2. vyd.; STU: Bratislava, Slovensko, 2006; ISBN 80-227-2459-9.
- 123 Kolb, B.; Ettre, L. S. *Static Headspace-Gas Chromatography: Theory and Practice*. 2. vyd.; Wiley and Sons: New Jersey, USA, 2006; ISBN 0-471-74944-3.
- 124 Kolb, J. *Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. 3. přeprac. vyd.; Grada: Praha, Česká republika, 2008; ISBN 978-80-247-2275-7.
- 125 Krutul, D.; Zielenkiewicz, T.; Zawadzki, J.; Radomski, A.; Antczak, A.; Drożdżek, M. Influence of urban environment originated heavy metal pollution on the extractives and mineral substances content in bark and wood of oak (*Quercus robur L.*). *Wood Res.* **2014**, *59*, 177-190.
- 126 Kymäläinen, H.-R.; Sjöberg, A.-M. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Build. Environ.* **2008**, *43*, 1261-1269.
- 127 Lehmann, S. Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions. *Sustain. Cities Soc.* **2013**, *6*, 57-67, doi:10.1016/j.scs.2012.08.004.
- 128 Li, G.H.; Wei, W.; Shao, X.; Nie, L.; Wang, H.L. A comprehensive classification method for VOCs emission sources to tackle air pollution based on VOCs species reactivity and emission amounts. *J. Environ. Sci.* **2018**, *67*, 78-88.

- 129 Ligor, M.; Buszewski, B. The comparison of solid phase microextraction-GC and static headspace-GC for determination of solvent residues in vegetable oils. *J. Sep. Science* **2008**, *31*, 364-371, doi:10.1002/jssc.200700303.
- 130 Little, J.C.; Kumar, D.; Cox, S.S.; Hodgson, A.T. Barrier materials to reduce contaminant emissions from structural insulated panels. In *Advances in Building Technology*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2002; s. 113–120.
- 131 Liu, R.; Wang, C.; Huang, A.; Lv, B. Characterization of Odors of Wood by Gas Chromatography-Olfactometry with Removal of Extractives as Attempt to Control Indoor Air Quality. *Molecules* **2018**, *23*, 203.
- 132 Liu, Y.; Shen J.; Zhu, X. Influence of processing parameters on VOC emission from particleboards. *Environ. Monit. Assess.* **2010**, *171*, 249-254, doi:10.1007/s10661-009-1275-0.
- 133 Liu, Y.; Shen, J.; Zhu, X.D. Headspace solid-phase microextraction for the determination of volatile organic compounds in *Larix gmelini* particles. *Phys. Procedia* **2012**, *32*, 605–613, doi:10.1016/j.phpro.2012.03.607.
- 134 Liu, Y.; Zhu, X. Measurement of formaldehyde and VOCs emissions from wood based panels with nanomaterial added melamine impregnated paper. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *66*, 132–137, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.088.
- 135 Macchioni, F.; Cioni, P.L.; Flamini, G.; Morelli, I.; Maccioni, S.; Ansaldi, M. Chemical composition of essential oils from needles, branches and cones of *Pinus pinea*, *P. halepensis*, *P. pinaster* and *P. nigra* from central Italy. *Flavour Fragr. J.* **2003**, *18*, 139-143, doi:10.1002/ffj.1178.
- 136 Madureira, J.; Paciencia, I.; Pereira, C.; Teixeira, J.P.; Fernandes, E.O.; Indoor air quality in Portuguese schools: levels and sources of pollutants. *Indoor Air* **2016**, *26*, 526-37, doi:10.1111/ina.12237.
- 137 Makowski, M.; Ohlmeyer, M. Comparison of a small and a large environmental test chamber for measuring VOC emissions from OSB made of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Holz Roh-Werkst.* **2006**, *64*, 469–472, doi:10.1007/s00107-006-0123-y.
- 138 Manninen, A.-M.; Pasanen, P.; Holopainen, J.K. Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated Scots pine wood. *Atmos. Environ.* **2002**, *36*, 1763–1768, doi:10.1016/S1352-2310(02)00152-8.
- 139 Manousi, N.; Sarakatsianos, I.; Samanidou, V. 10 - Extraction Techniques of Phenolic Compounds and Other Bioactive Compounds From Medicinal and Aromatic Plants. In *Engineering Tools in the Beverage Industry*, 1. vyd.; Grumezescu, A.M.; Holban, A.M.; Woodhead Publishing: Sawston, Velká Británie, 2019; s. 283-314; ISBN 978-0-12-815258-4.

- 140 Márton, J. *Stavby ze slaměných balíků: slaměné izolace v nízkoenergetických a pasivních domech, návrh staveb šetrných k životnímu prostředí, hliněné omítky, ozeleněné střechy*. 2. dopl. a aktualiz. vyd. J. Márton: Liberec, Česká republika, 2014; ISBN 978-80-260-5713-0.
- 141 Maskell, D.; da Silva, C.F.; Mower, K.; Cheta, R.; Dengel, A.; Ball, R.; Ansell, M.; Walker, P.; Shea, A. Properties of bio-based insulation materials and their potential impact on indoor air quality. In Proceedings of the First International Conference on Bio-Based Building Materials, Clermont-Ferrand, France, 22.–24. červen 2015.
- 142 Masson, G.; Puech, J.L.; Moutonnet, M. Composition chimique du bois de chêne de tonnellerie. *Bull. O.I.V.* **1996**, *69*, 635-657.
- 143 Matsubara, E.; Kawai, S. VOCs emitted from Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) interior walls induce physiological relaxation. *Build. Environ.* **2014**, *72*, 125-130, doi:10.1016/j.buildenv.2013.10.023.
- 144 Mayes, D.; Oksanen, O. *ThermoWood Handbook*. Finnforest: Finsko, 2002.
- 145 McDonald, A.G.; Wastney, S. Analysis of Volatile Emissions from Kiln Drying of Radiata Pine. In Proceedings of the 8th International Symposium on Wood and Pulping Chemistry, Helsinki, Finland, 6.–9. červen, 1995; s. 434–436.
- 146 McGraw, G.W.; Hemingway, R.W.; Ingram Jr., L.L.; Canady, C.S.; McGraw, W.B. Thermal degradation of terpenes: camphene, Δ^3 -carene, limonene, and α -terpinene. *Environ. Sci. Tech.* **1999**, *33*, 4029-4033, doi:10.1021/es9810641.
- 147 Mirošová, P. 2012. *Stanovení těkavých látek ve vybraných typech nefermentovaných čajů metodou GC-MS*. Master Thesis, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín, Czech Republic.
- 148 Møhlhave, L. Volatile Organic Compounds, Indoor Air Quality and Health. *Indoor Air* **1991**, *1*, 357-376.
- 149 Mwaikambo, L.Y.; Ansell, M.P. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *J. Appl. Polym. Sci.* **2002**, *84*, 2222 – 2234, doi:10.1002/as.10460.
- 150 Nascimento, E.; Morais, S.; García-Vallejo, M. The Composition Of Wood Extracts from Spanish Pinus Pinaster And Brazilian Pinus Caribaea. *J. Braz. Chem. Soc.* **1995**, *6*, 331-336, doi:10.5935/0103-5053.19950056.
- 151 Nicolle, J.; Desauziers, V.; Mocho, P. Solid phase microextraction sampling for a rapid and simple on-site evaluation of volatile organic compounds emitted from building materials. *J. Chromatogr. A* **2008**, *1208*, 10–15.
- 152 Notheim, C.M.; Leovic, K.W.; Shaver, E.M. *The application of pollution prevention to reduce indoor air emissions from office equipment and from composite wood materials*; Environmental Protection Agency: Washington, D.C., USA, 2002.

- 153 Nuopponen, M.; Vuorinen, T.; Jämsä, S.; Viitaniemi, P. The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods. *Wood Sci. Technol.* **2003**, *37*, 109–115, doi:10.1007/s00226-003-0178-4.
- 154 Ohlmeyer, M.; Makowski, M.; Schöler, M.; Hasch, J.; Fried, H. *Entwicklung von Konzepten zur Reduzierung von VOC-Emissionen aus Holz und Holzwerkstoffen unter Berücksichtigung des Herstellungsprozesses – weiterführende Untersuchungen*. Arbeitsbericht. 2008/1; Institut für Holztechnologie und Holzbiologie: Hamburg, Německo; 2008.
- 155 Opekar, F. *Základní analytická chemie*. 2. vyd.; Karolinum: Praha, Czech Republic, 2010; ISBN 978-80-246-1775-6.
- 156 Oskouei, A.V.; Afzali, M.; Madadipour, M. Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests. *Constr. Build Mater.* **2017**, *142*, 137–147.
- 157 Ouinsavi, C.; Sokpon, N.; Bada, O. Utilization and traditional strategies of in situ conservation of iroko (*Milicia excels Welw. C.C. Berg*) in Benin. *For. Ecol. Manag.* **2005**, *207*, 341–350, doi:10.1016/j.foreco.2004.10.069.
- 158 Özel, M.Z.; Gögüs, F.; Lewis, A.C. Composition of *Eucalyptus camaldulensis* Volatiles Using Direct Thermal Desorption Coupled with Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography—Time-of-Flight-Mass Spectrometry. *J. Chromatogr. Sci.* **2008**, *46*, 157-161, doi:10.1093/chromsci/46.2.157.
- 159 Packman, D.F. The acidity of wood. *Holzforschung* **1960**, *14*, 178-183.
- 160 Panyakaew, S.; Fotios, S. New thermal insulation boards made from coconut husk and bagass. *Energy Build.* **2011**, *43*, 1732-1739.
- 161 Patříčný, M. *Tajemství dřeva*. 1. vyd. ISMC Bohemia: Brno, Česká republika, 2018; ISBN: 978-80-86919-29-4.
- 162 Pavelek, M. 2019. *Analýza stavebních obvodových konstrukcí na bázi dřeva z hlediska tepelných vlastností*. Disertační práce, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, Česká republika.
- 163 Pavelek, M.; Adamová, T. Bio-Waste Thermal Insulation Panel for Sustainable Building Construction in Steady and Unsteady-State Conditions. *Materials* **2019**, *12*, doi.org/10.3390/ma12122004.
- 164 Pei, J.; Yin, Y.; Tianjin, J.L. Long-term indoor gas pollutant monitor of new dormitories with natural ventilation. *Energy Build.* **2016**, *129*, 514-523, doi:10.1016/j.enbuild.2016.08.033.
- 165 Pelantová, H. 2005. *Aplikace NMR spektrometrie v metabolomice*. Disertační práce, Univerzita Paleckého v Olomouci, Olomouc, Česká republika.

- 166 Pérez-Coello, M.S.; Sanz, J.; Cabezudo, M.D. Analysis of volatile components of oak wood by solvent extraction and direct thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry. *J. Chromatogr. A* **1997**, *778*, 427-434, doi:10.1016/S0021-9673(97)00286-0.
- 167 Peters, J., Fischer, K., and Fischer, S. Characterization of emissions from thermally modified wood and their reduction by chemical treatment. *Bioresources* **2008**, *3*, 491-502.
- 168 Picot, S.D.; Watson, J.J.; Jones, J.W. A global inventory of volatile organic compound emissions from anthropogenic sources. *J. Geophys. Res.* **1992**, *97*, 9897-9912, doi:10.1029/92JD00682.
- 169 Pinto, J.; Paiva, A.; Varum, H.; Costa, A.; Cruz, D.; Pereira, S.; Fernandes, L.; Tavares, P.; Agarwal, J. Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material. *Energy Build.* **2011**, *43*, 1985-1990.
- 170 Prałat, K. Research on thermal conductivity of the wood and analysis of results obtained by the hot wire method. *Experimental Techniques* **2016**, *40*, 973-980, doi:10.1007/s40799-016-0096-7.
- 171 Pulselli, R.M.; Simoncini, E.; Pulselli, F.M.; Bastianoni, S. Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Emergy indices to evaluate housing sustainability. *Energy Build.* **2007**, *39*, 620-628, doi:10.1016/j.enbuild.2006.10.004.
- 172 Qi, Y.; Shen, L.; Zhang, J.; Yao, J.; Lu, R.; Miyakoshi, T. Species and release characteristics of VOCs in furniture coating process. *Environ. Pollut.* **2019**, *245*, 810-819, doi:10.1016/j.envpol.2018.11.057.
- 173 Ramesh, T.; Prakash, R.; Shukla, K.K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy Build.* **2010**, *42*, 1592-1600, doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.007.
- 174 Ran, H.; Zhang, J.; Gao, Q.; Lin, Z.; Bao, J. Analysis of biodegradation performance of furfural and 5-hydroxymethylfurfural by *Amorphotheca resinae* ZN1. *Biotechnol. Biofuels* **2014**, *7*, 51, doi:10.1186/1754-6834-7-51.
- 175 Rassem, H.H.A.; Nour, A.H.; Yunus, R.M. Techniques for Extraction of Essential Oils from Plants: A Review. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* **2016**, *10*, 117-127.
- 176 Raysoni, A.U.; Stock, T.H.; Sarnat, J.A.; Montoya Sosa, T.; Sarnat, S.E.; Holguin, F.; Greenwald, R.; Johnson, B.; Li, W.W. Characterization of traffic-related air pollutant metrics at four schools in El Paso, Texas, USA: implications for exposure assessment and siting schools in urban areas. *Atmos. Environ.* **2013**, *80*, 140-151, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.07.056.
- 177 Reinprecht, L. *Ochrana dreva*. 1. vyd.; Technická univerzita vo Zvolene: Zvolen, Slovensko, 2008; ISBN 978-80-228-1863-6.

- 178 Reinprecht, L.; Vidholdová, Z. *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie*. 1. vyd. Technická univerzita vo Zvolene: Zvolen, Slovensko. 2008; ISBN 978-80-228-1920-6.
- 179 Renoux, H. Cedrus libani, a homeopathic medicinal product coming from a symbolic tree. From the pathogenetic trial, clinical cases and a reflection on the myths and botany of the Lebanon cedar. *Rev. d'Homeopathie* **2021**, *12*, 30-35, doi:10.1016/j.revhom.2021.07.020.
- 180 *Residential Energy Efficiency Database, Residential Indoor Air Quality*; Information Technology Specialists Inc.: Bowie, MD, USA, 1996.
- 181 Richter, B.; Jones, B.A.; Ezzell, J.L.; Porter, N.L.; Avdalovic, N.; Pohl, Ch. Accelerated solvent extraction: A technique for sample preparation. Accelerated solvent extraction: a technology for sample preparation. *Anal. Chem.* **1996**, *68*, 1033-1039.
- 182 Risholm-Sundman, M.; Lundgren, M.; Vestin, E.; Herder, P. Emissions of acetic acid and other volatile organic compounds from different species of solid wood. *Holz Roh-Werkst.* **1998**, *56*, 125-129.
- 183 Roffael, E. Significance of wood extractives for wood bonding. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2016**, *100*, 1589–1596, doi:10.1007/s00253-015-7207-8.
- 184 Roffael, E. Volatile organic compounds and formaldehyde in nature, wood and wood based panels. *Holz Roh-Werkst.* **2006**, *64*, 144-149, doi:10.1007/s00107-005-0061.
- 185 Roffael, E.; Gabriel, M.; Schneider, T.; Behn, C. Influence of pulping technology on the release of formaldehyde and volatile organic acids from oak fibres and medium density fibreboards (MDF) prepared therefrom. *Eur. J. Wood Prod.* **2018**, *76*, 397–399.
- 186 Ruiz-Perez, D.; Guan, H.; Madhivanan, P.; Mathee, K.; Narasimhan, G. So you think you can PLS-DA? *BMC Bioinformatics* **2020**, *21 (Suppl 1)*, 2, doi:10.1186/s12859-019-3310-7.
- 187 Saeed, N.; Malen, J.A.; Chamanzar, M.; Krishnamurti, R. Experimental correlation of thermal conductivity with dielectric properties of wood and wood-based materials: possibilities for rapid in-situ building energy evaluation. *J. Build. Eng.* **2022**, *50*, 104178, doi:10.1016/j.job.2022.104178.
- 188 Salthammer, T.; Fuhrmann, F. Release of acetic acid and furfural from cork products. *Indoor air* **2000**, *10*, 133-134.
- 189 Schäfer, M.; Roffael, E. On the formaldehyde release of wood. *Holz Roh-Werkst.* **2000**, *58*, 259–264.

- 190 Scrinzi, E.; Rossi, S.; Deflorian, F.; Zanella, C. Evaluation of aesthetic durability of waterborne polyurethane coatings applied on wood for interior applications. *Prog. Org. Coat.* **2011**, *72*, 81-87, doi:10.1016/j.porgcoat.2011.03.013.
- 191 Senila, L.; Miclean, M.; akd, M.; Roman, M.; Roman, C. New analysis method of furfural obtained from wood applying an autohydrolysis pretreatment. *Rom. Biotech. Lett.* **2013**, *18*, 7947-7955.
- 192 Sharma, M.; Grewal, K.; Jandrotia, R.; Batish, D.R.; Singh, H.P.; Kohli, R.K. Essential oils as anticancer agents: Potential role in malignancies, drug delivery mechanisms, and immune system enhancement. *Biomed. Pharmacother.* **2022**, *146*, 112514, doi:10.1016/j.biopha.2021.112514.
- 193 Sharma, S.; Kumar Sharma, N. Advanced materials contribution towards sustainable development and its construction for green buildings. *Mater. Today: Proc.* **2022**, *68*, doi:10.1016/j.matpr.2022.07.394.
- 194 Shellie, R.; Marriott, P.; Cornwell, C. Characterization and Comparison of Tea Tree and Lavender Oils by Using Comprehensive Gas Chromatography. *J. High Resol. Chromatogr.* **2000**, *23*, 554-560, doi:10.1002/1521-4168(20000901)23:9<554::AID-JHRC554>3.0.CO;2-F.
- 195 Shen, J.; Shao, X. A comparison of accelerated solvent extraction, Soxhlet extraction, and ultrasonic-assisted extraction for analysis of terpenoids and sterols in tobacco. *Anal. Bioanal. Chem.* **2005**, *383*, 1003-1008, doi:10.1007/s00216-005-0078-6.
- 196 Simon, V.; Dumergues, L.; Ponche, J.-L.; Torres, L. The biogenic volatile organic compounds emission inventory in France. Application to plant ecosystems in Berre-Marseilles area (France). *Sci. Total Environ.* **2006**, *372*, 164-182, doi:10.1016/j.scitotenv.2006.08.019.
- 197 Simon, V.; Uitterhaegen, E.; Robillard, A.; Ballas, S.; Véronèse, T.; Vilarem, G.; Merah, O.; Talou, T.; Evon, P. VOC and carbonyl compound emissions of a fiberboard resulting from a coriander biorefinery: Comparison with two commercial wood-based building materials. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2020**, *27*, 16121-16133.
- 198 Singleton, R.; Salkoski, A.J.; Bulkow, L.; Fish, C.; Dobson, J.; Albertson, L.; Housing characteristics and indoor air quality in households of Alaska Native children with chronic lung conditions. *Indoor Air* **2017**, *27*, 478-486.
- 199 Sivrikaya, H.; Tesařová, D.; Jeřábková, E.; Can, A. Color change and emission of volatile organic compounds from Scots pine exposed to heat and vacuum-heat treatment. *J. Build. Eng.* **2019**, *26*, 100918, doi:10.1016/j.jobe.2019.100918.
- 200 Skov, H.; Hansen, A. B.; Lorenzen, G.; Andersen, H. V.; Lofstrom, P.; Christensen, C. S. Benzene exposure and the effect of traffic pollution in Copenhagen Denmark. *Atmos. Environ.* **2001**, *35*, 2463-2471, doi:10.1016/S1352-2310(00)00460-X.

- 201 Sohn, J.L.; Kalbar, P.P.; Birkved, M. Life cycle based dynamic assessment coupled with multiple criteria decision analysis: a case study of determining an optimal building insulation level. *J. Clean. Prod.* **2017**, *162*, 449-457, doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.058.
- 202 Souza-Silva, É.; Pawliszyn, J. Recent Advances in Solid-Phase Microextraction for Contaminant Analysis in Food Matrices. *Compr. Anal- Chem.* **2017**, *76*, 483-517, doi:10.1016/bs.coac.2017.03.002.
- 203 Spengler, J.D.; Samet, J.M.; McCarthy, J.F. *Indoor Air Quality Handbook*, 1. vyd.; McGraw-Hill Professional: New York, NY, USA 2001; ISBN-13 978-0074455494.
- 204 Stachowiak-Wencek, A.; Pradzyński, W. Emission of volatile organic compounds from wood of exotic species. *For. Wood Technol.* **2014**, *86*, 215-219.
- 205 Su, W.; Hui, Y.; Banerjee, S. Field-proven strategies for reducing volatile organic carbons from hardwood drying. *Environ. Sci. Technol.* **1999**, *33*, 1056-1059.
- 206 Summerscales, J.; Dissanayake, N.; Hall, W.; Virk, A.S. A review of bast fibres and their composites. Part 1: Fibres as reinforcements. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **2010**, *41*, 1329-1335, doi:10.1016/j.compositesa.2010.06.001.
- 207 Sun, S.; Zhao, Z.; and Shen, J. Effects of the manufacturing conditions on the VOCs emissions of particleboard. *BioRes.* **2020**, *15*, 1074-1084, doi:10.15376/biores.15.1.1074-1084.
- 208 Sutton, B.A.; Woosley, R.S.; David, J.; Butcher, D.J. Determination of monoterpenes in oleoresin: A chemosystematic study of the interaction between Fraser fir (*Abies fraseri*) and balsam woolly adelgid (*Adelges piceae*). *Microchem. J.* **1997**, *56*, 332-342.
- 209 Svedberg, U.R.A.; Högberg, H-E.; Högberg, J.; Galle, B. Emission of hexanal and carbonmonoxide from storage of wood pellets, a potential occupational and domestic health hazard. *Ann. Occup. Hyg.* **2004**, *48*, 339-349, doi:10.1093/annhyg/meh015.
- 210 Štulík, K. *Analytické separační metody*, 1. vyd.; Karolinum: Praha, Czech Republic, 2005. ISBN 80-246-0852-9.
- 211 Tanaka-Kagawa, T.; Uchiyama, S.; Matsushima, E.; Sasaki, A.; Kobayashi, H.; Kobayashi, H.; Yagi, M.; Tsuno, M.; Arao, M.; Ikemoto, K.; *et al.* Survey of volatile organic compounds found in indoor and outdoor air samples from Japan. *Bull. Natl. Inst. Health Sci.* **2005**, *123*, 27-31.
- 212 Tang, C.C.; Li, Y.; Kurnaz, L.B.; Li, J. Development of eco-friendly antifungal coatings by curing natural seed oils on wood. *Prog. Org. Coat.* **2021**, *161*, 106512, doi:10.1016/j.porgcoat.2021.106512.
- 213 Tartaglia, A.; Locatelli, M.; Kabir, A.; Furton, K.G.; Macerola, D.; Sperandio, E.; Piccolantonio, S.; Ulusoy, H.I.; Maroni, F.; Bruni, P.; Croce, F.; Samanidou, V.F.

- Comparison between Exhaustive and Equilibrium Extraction Using Different SPE Sorbents and Sol-Gel Carbowax 20M Coated FPSE Media. *Molecules* **2019**, *24*, 382, doi:10.3390/molecules24030382.
- 214 Taylor, A.M.; Labbé, N.; Noehmer, A. NIR-based prediction of extractives in American white oak heartwood. *Holzforschung*, **2011**, *65*, 185-190, doi:10.1515/hf.2011.026.
- 215 Tesařová, D. 2002. *Emise organických těkavých látek z nátěrových povrchových úprav*. Disertační práce, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, Česká republika.
- 216 Thurston, G.D. Outdoor Air Pollution: Sources, Atmospheric Transport, and Human Health Effects. In *International Encyclopedia of Public Health*, 2. vyd.; Quah, S.R., Ed.; Elsevier: Cambridge, MA, USA, 2017; Volume 5, s. 367-377; ISBN 978-0-12-803708-9.
- 217 Tie, X.X.; Li, G.H.; Ying, Z.M. Biogenic emissions of isoprenoids and NO in China and comparison to anthropogenic emissions. *Sci. Total Environ.* **2006**, *371*, 238-251, doi:10.1016/j.scitotenv.2006.06.025.
- 218 Todaro, L.; Russo, D.; Cetera, P.; Milell, L. Effects of thermo-vacuum treatment on secondary metabolite content and antioxidant activity of poplar (*Populus nigra* L.) wood extracts. *Ind. Crops Prod.* **2017**, *109*, 384-390, doi:10.1016/j.indcrop.2017.08.052.
- 219 Tofanica, B.M.; Capelletto, E.; Gavrilesco, D.; Mueller, K. Properties of Rapeseed (*Brassica napus*) stalks fibers. *J. Nat. Fibers* **2011**, *8*, 241-262.
- 220 Tong, R.; Zhang, L.; Yang, X.; Liu, J.; Zhou, P.; Li, J. Emission characteristics and probabilistic health risk of volatile organic compounds from solvents in wooden furniture manufacturing. *J. Clean Prod.* **2018**, *208*, 1096–1108.
- 221 Tran, V.V.; Park D.; Lee, Y.-C. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* **2020**, *17*, 2927, doi:10.3390/ijerph17082927.
- 222 Tümen, I.; Reunanen, M. A Comparative Study on Turpentine Oils of Oleoresins of *Pinus sylvestris* L. from Three Districts of Denizli. *Rec. Nat. Prod.* **2010**, *4*, 224-229.
- 223 U.S. Department of Agriculture. Global agricultural Information Network: EU-28 Oilseeds and Products Annual. In: *Analýza stavebních obvodových konstrukcí na bázi dřeva z hlediska tepelných vlastností*. Disertační práce, ČZU: Praha, Česká republika, 2019.
- 224 Uçar, G.; Balaban, M.; Usta, M. Volatile needle and wood extracts of oriental spruce *Picea orientalis* (L.). *Flavour Fragr. J.* **2003**, *18*, 368-375, doi:10.1002/ffj.1196.

- 225 Uitterhaegen, E.; Quang, H.N.; Othmane, M.; Stevens, C.H.V.; Talou, T.; Rigal, L.; Evon, P. New renewable and biodegradable fiberboards from a coriander press cake. *J. Renew. Mater.* **2016**, *3*, 225–238.
- 226 Van der Wal, J.F., Hoogeveen, A.W.; Wouda, P. The Influence of Temperature on the Emission of Volatile Organic Compounds from PVC flooring, Carpet, and Paint. *Indoor Air* **1997**, *7*, 215-221, doi:10.1111/j.1600-0668.1997.t01-1-00007.x.
- 227 Vay, O.; De borst, K.; Hansmann, K.; Teischinger, A.; Müller, U. Thermal conductivity of wood at angles to the principal anatomical directions. *Wood Sci. Technol.* **2015**, *49*, 577-589.
- 228 Venkatarama Reddy, B.V.; Jagadish, K.S. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy Build.* **2003**, *35*, 129-137, doi:10.1016/S0378-7788(01)00141-4.
- 229 Vichi, S.; Santini, C.; Natali, N.; Riponi, C.; López-Tamames, E.; Buxaderas, S. Volatile and semi-volatile components of oak wood chips analysed by Accelerated Solvent Extraction (ASE) coupled to gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS). *Food Chem.* **2007**, *102*, 1260-1269, doi:10.1016/j.foodchem.2006.07.023.
- 230 Viiri, H.; Annila, E.; Kitunen, V.; Niemelä, P. Induced responses in stilbenes and terpenes in fertilized Norway spruce after inoculation with blue-stain fungus, *Ceratocystis polonica*. *Trees* **2001**, *15*, 112-122, doi: 10.1007/s004680000082.
- 231 Vololonirina, O.; Coutand, M.; Perrin, B. Characterization of hygrothermal properties of wood-based products–Impact of moisture content and temperature. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *63*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.014.
- 232 Wajs, A.; Pranovich, A.; Reunanen, M.; Willför, S.; Holmbom, B. Characterisation of volatile organic compounds in stemwood using solid-phase microextraction. *Phytochem. Anal.* **2006**, *17*, 91-101, doi:10.1002/pca.891.
- 233 Wajs, A.; Pranovich, A.; Reunanen, M.; Willför, S.; Holmbom, B. Headspace-SPME analysis of the sapwood and heartwood of *Picea Abies*, *Pinus Sylvestris* and *Larix Decidua*. *J. Essent. Oil Res.* **2007**, *19*, 125–133, doi:10.1080/10412 905.2007.96992 44.
- 234 Wambua, P.; Ivens, J.; Verpoest, I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Compos. Sci. Technol.* **2003**, *63*, 1259–1264.
- 235 Wang, W.; Zmeureanu, R.; Rivard, H. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Build. Environ.* **2005**, *40*, 1512-1525, doi:10.1016/j.buildenv.2004.11.017.
- 236 Wei, K.; Lv, Ch.; Chen, M.; Zhou, X.; Dai, Z.; Shen, D. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. *Energy Build.* **2015**, *87*, 116-122.

- 237 Weisel, C.P.; Zhang, J.; Turpin, B.J.; Morandi, M.T.; Colome, S.; Stock, T.H.; Spektor, D.M.; Korn, L.; Winer, A.; Knon, J., et al. Relationships of Indoor, Outdoor and Personal Air (RIOPA). Part. I. Collection Methods and Descriptive Analyses. *Res Rep. Health Eff. Inst.* **2005**, *130*, 1-107.
- 238 Wiglusz, R.; Nikel, G.; Igielska, B.; Sitko, E. Volatile Organic Compounds Emissions from Particleboard Veneered with Decorative Paper Foil. *Holzforschung*, **2002**, *56*, 108-110, doi:10.1515/HF.2002.018.
- 239 Willför, S.; Hafizoglu, H.; Tümen, I.; Yazici, H.; Arfan, M.; Ali, M.; Hombom, B. Extractives of Turkish and Pakistani Tree Species. *Holz Roh-Werkst.* **2007**, *65*, 215-221, doi:10.1007/s00107-006-0160-6.
- 240 Wilke, O.; Brozowski, F.; Wiegner, K.; Braue, F. Bestimmung der VOC-Emissionen aus Grobspanplatten (OSB Platten) und ihre Bewertung nach dem AgBB-Schema. *Umwelt und Mensch – Informationsdienst* **2013**, *1*, 5-11.
- 241 Wiśniewska, P.; Dymerski, T.; Wardencki, W.; Namieśnik, J. Chemical composition analysis and authentication of whisky. *J. Sci. Food Agricult.* **2015**, *95*, 2159-2166, doi:10.1002/jsfa.6960.
- 242 Wolkoff, P. How to measure and evaluate volatile organic compound emissions from building products. A perspective. *Sci. Total Environ.* **1999**, *227*, 197-213.
- 243 World Health Organization. 1989. *Indoor Air Quality: Organic Pollutants*. Copenhagen: WHO Reg. Office for Europe.
- 244 World Health Organization. *Guidelines for Indoor Air Quality: Dampness and Mould*; WHO: Ženeva, Švýcarsko, 2009.
- 245 Xi, Z.; Zhiwei, L.; Wu, Y. Human physiological responses to wooden indoor environment. *Physiol. Behav.* **2017**, *174*, 27-34, doi:10.1016/j.physbeh.2017.02.043.
- 246 Yasuda, R.; Minato, K. Chemical modification of wood by non-formaldehyde crosslinking reagents. *Wood Sci. Technol.* **1994**, *28*, 101-110.
- 247 You, Z.Q.; Zhu, Y.; Jang, C.; Wang, S.X.; Gao, J.; Lin, CH.J.; Li, M.; Zhu, Z.; Wei, H.; Yang, W. Response surface modeling-based source contribution analysis and VOCs emission control policy assessment in a typical ozone-polluted urban Shunde, China. *J. Environ. Sci.* **2017**, *51*, 294-304, doi:10.1016/j.jes.2016.05.034.
- 248 Yuan, H. Modeling VOCs Emissions from Multi-Layered Structural Insulated Panels (SIPs). Ph.D. Thesis, Polytechnic Institute and State University Virginia, Blacksburg, VA, USA, 2005.
- 249 Zahri, S.; Moubarik, A.; Charrier - El Bouhtoury, F.; Chaix, G.; Baillères, H.; Nepveu, G.; Charrier, B. Quantitative assessment of total phenol contents of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) by diffuse reflectance NIR spectroscopy on solid wood surfaces. *Holzsforschung* **2008**, *62*, 679-687, doi:10.1515/HF.2008.114.

- 250 Zeitsch, K.J. *The chemistry and technology of furfural and its many by-products.* ed.; 1.vyd. Elsevier: Amsterdam, Nizozemsko, 2000; ISBN 9780080528991.
- 251 Zhou, X.-Y.; Zheng, F.; Li, H.-G.; Lu, Ch.-L.; An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibres. *Energy Build.* **2010**, *42*, 1070-1074.
- 252 Zimmer, K.; Melcher, E. A screening study on extractive content and composition of Scots pine heartwood of three stands with close proximity and their resistance against basidiomycetes, *Int. Wood Prod. J.* **2017**, *8*, 45-49, doi:10.1080/20426445.2016.1271091.

Legislativní dokumenty a technické normy

- ČSN EN ISO 16000-9:2006. *Vnitřní ovzduší – Část 9: Stanovení emisí těkavých organických látek ze stavebních materiálů a nábytku – Metoda zkušební komory*; Český normalizační institut: Praha, Česká republika, 2007.
- ČSN EN ISO 16000-11:2006. *Vnitřní ovzduší – Část 11: Stanovení emisí těkavých organických látek ze stavebních materiálů a nábytku – Odběr, uchovávání a úprava vzorku*; Český normalizační institut: Praha, Česká republika, 2007.
- ČSN 73 0540-1. *Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie*; Český normalizační institut: Praha, Česká republika, 2005.
- EN ISO 16000-5. *Vnitřní ovzduší - Část 5: Postup odběru vzorků těkavých organických látek (VOC)*. Český normalizační institut: Praha, Czech Republic, 2007.
- Evropská komise. Commission Delegated Regulation (EU) No 157/2014 of 30 October 2013 on the conditions for making a declaration of performance on construction products. Dostupné online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0157> (cit. 20. leden 2021), 2013.
- Evropský parlament a Rada EU. Nařízení č. 305/2011, kterým se stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh a který zrušuje směrnice Rady 89/106/EHS. Dostupné online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02011R0305-20210716&qid=1626786922528&from=CS> (cit. 10. září 2022), 2011.
- Vláda České republiky. Nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky. Dostupné online: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=163&r=2002> (cit. 9. září 2022), 2002.
- Vláda České republiky. Zákon o ochraně ovzduší č. 86/2002 Sb., § 2. Praha, Česká republika, **2002**.

Internetové zdroje

- AVMI. Co je minerální izolace. Dostupné online: <https://www.avmi.cz/co-je-mineralni-izolace> (cit. 20. září, 2022).
- Český statistický úřad. Téměř 15 % nových rodinných domů jsou dřevostavby. Dostupné online: <https://www.czso.cz/csu/czso/temer-15-novych-rodinnych-domu-jsou-drevostavby> (cit. 20. září 2022), 2021.
- Environmental Protection Agency. Sources and factors affecting indoor air emissions from engineered wood products: summary and evaluation of current literature. Dostupné online: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100V0XC.PDF?Dockey=P100V0XC.PDF> (cit. 16. červen 2020).
- FAO. Food and agriculture data. Dostupné online: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> (cit. 5. květen, 2019).
- Grand View Research; Low-Volatile Organic Compounds (VOC) Coating Additives Market Analysis, Market Size, Application Analysis, Regional Outlook, Competitive Strategies, and Forecasts, 2015 To 2022. Dostupné online: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/low-volatile-organic-compounds-coating-additives-market> (cit. 1. únor 2019).
- Grand View Research. Low-Volatile Organic Compounds Coating Additives Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application, Regional Outlook, And Segment Forecasts, 2019 To 2025. Dostupné online: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/> (cit. 16. červen 2020).
- Hofer, P. Jedovatý polystyren: rakovintvorné zateplení budov. Dostupné online: <https://www.zdrave-bydleni.com/jedovaty-polystyren-rakovintvorne-zatepleni-budov/> (cit. 9. září 2022), 2017.
- K-flex izolace. K-Flex izolace ze syntetického kaučuku. Dostupné online: <https://www.kflex-izolace.cz/> (cit. 19. listopad 2022), 2022.
- HMDB. alpha-Bergamotene. Dostupné online: <https://hmdb.ca/metabolites/HMDB0036678> (cit. 10. listopad 2022).
- Institut pro testování a certifikaci. Emise nebezpečných látek ze stavebních výrobků. Dostupné online: <https://www.itczlin.cz/novinka/emise-nebezpecnych-latek-ze-stavebnich-vyrobku> (cit. 12. říjen 2021), 2021.
- Institute of Health Technology and Prevention Research. Stone Pine - Positive health effects of Stone Pine furniture. Dostupné online: http://www.zirbe.info/files/pdf_zirbenholz_folder_en.pdf (cit. 26. červen 2020).

- Markets and Markets. Building Thermal Insulation Market by Material (Glasswool, Stonewool, Plastic Foam), Application (Roof Insulation, Floor Insulation, Wall Insulation), Building Type (Residential, Non-Residential) and Region-Global Forecast to 2027. Dostupné online: <https://www.marketsandmarkets.com/Thanks/subscribepurchase.asp?id=510> (cit. 20. srpen 2022), 2022.
- NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards, Appendix: Aldehydes and NIOSH 2018: Aliphatic Aldehydes. Available online: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0652.html> (cit. 10. únor 2019).
- Practice Architecture. Flat House. Dostupné online: <https://practicearchitecture.co.uk/project/flat-house/> (cit. 5. září 2022), 2020.
- PubChem. Benzaldehyde. Dostupné online: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzaldehyde> (cit. 20. prosinec 2022), 2022.
- Shimadzu. Shimadzu SPME Arrows and Fibers. Dostupné online: <https://www.shimadzu.cz/SPME> (cit. 10. říjen 2022).
- Steico. *Steico protect dry*. Dostupné online: https://web.steico.com/fileadmin/steico/content/pdf/Marketing/Czech/Products/STEICOprotect_dry_cz_i.pdf (citováno 20. září 2022), 2019.
- The Revisionist. What is α -Thujene? Dostupné online: <https://www.therevisionist.org/bio-hacking/what-is-%CE%B1-thujene/> (cit. 10. prosinec 2022).

Seznam příloh

Příloha č. 1: Seznam vybraných látek dle ISO 16000-6 (2011) detekovaných ve vnitřním prostředí budov ze stavebních materiálů při odběru vzorku vzduchu ve zkušební komoře	129
Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor	135
Příloha č. 3: Protokol o zkoušce – k měření emise VOCs z OSB ve zkušební komoře.....	155
Příloha č. 4: Zdrojová data pro vyhodnocení stanovení VOCs v případě smrkových třísek a konopného pazdeří	158
Příloha č. 5: Zdrojová data pro vyhodnocení stanovení VOCs v případě izolačních materiálů	159

Příloha č. 1: Seznam vybraných látek dle ISO 16000-6 (2011) detekovaných ve vnitřním prostředí budov ze stavebních materiálů při odběru vzorku vzduchu ve zkušební komoře

ISO 16000-6:2011(E)

Annex A
(informative)

**Examples of compounds detected in indoor air
and from building products in test chambers**

**Table A.1 — Examples of compounds detected in indoor air
and emitted from building products in test chambers^{[20][21]}**

Chemical compound	CAS No.	Boiling point °C
Aromatic hydrocarbons		
1,2,3-Trimethylbenzene	526-73-8	176
1,2,4,5-Tetramethylbenzene	95-93-2	197
1,2,4-Trimethylbenzene	95-63-6	169
1,3,5-Trimethylbenzene	108-67-8	165
1,3-Diisopropylbenzene	99-62-7	203
1,4-Diisopropylbenzene	100-18-5	203
1-Methyl-2-propylbenzene	1074-17-5	
1-Methyl-3-propylbenzene	1074-43-7	175
1-Propenylbenzene	637-50-3	175
2-Ethyltoluene	611-14-3	165
3-Ethyltoluene/4-ethyltoluene	620-14-4/622-96-8	162
2-Phenyloctane	777-22-0	123
4-Phenylcyclohexene	4994-16-5	251 ^a
5-Phenyldecane	4537-11-5	
5-Phenylundecane	4537-15-9	
α -Methylstyrene	98-83-9	165
Benzene	71-43-2	80
Ethylbenzene	100-41-4	136
Ethylbenzene/Ethynylbenzene	536-74-3	144
Isopropylbenzene	98-82-8	152
<i>m-p</i> -Methylstyrene	100-80-1/622-97-9	168/169
<i>m-p</i> -Xylene	108-38-3/106-42-3	139/138
Naphthalene	91-20-3	218
<i>n</i> -Butylbenzene	104-51-8	183
<i>n</i> -Propylbenzene	103-65-1	159
α -Methylstyrene	611-15-4	171
α -Xylene	95-47-6	144
Styrene	100-42-5	145
Toluene	108-88-3	111

Příloha č. 1: Seznam vybraných látek dle ISO 16000-6 (2011) detekovaných ve vnitřním prostředí budov ze stavebních materiálů při odběru vzorku vzduchu ve zkušební komoře – pokračování

ISO 16000-6:2011(E)

Table A.1 (continued)

Chemical compound	CAS No.	Boiling point °C
Aliphatic hydrocarbons n-C₆ to n-C₁₆		
1-Decene	872-05-9	171
1-Octene	111-66-0	121
2,2,4,6,6-Pentamethylheptane	13475-82-6	178
2,4,6-Trimethyloctane	62016-37-9	
2-Methylhexane	591-76-4	90
2-Methylnonane	871-83-0	167
2-Methyloctane	3221-61-2	143
2-Methylpentane	107-83-5	60 ^b
3,5-Dimethyloctane	15869-93-9	159
3-Methylhexane	589-34-4	92
3-Methyloctane	2216-33-3	143
3-Methylpentane	96-14-0	63 ^b
4-Methyldecane	2847-72-5	189
Isododecane	31807-55-3	216
<i>n</i> -Decane	124-18-5	174
<i>n</i> -Dodecane	112-40-3	216
<i>n</i> -Heptane	142-82-5	98
<i>n</i> -Hexadecane	544-76-3	287
<i>n</i> -Hexane	110-54-3	69
<i>n</i> -Nonane	111-84-2	151
<i>n</i> -Octane	111-65-9	125
<i>n</i> -Pentadecane	629-62-9	271
<i>n</i> -Tetradecane	629-59-4	254
<i>n</i> -Tridecane	629-50-5	235
<i>n</i> -Undecane	1120-21-4	196
Cycloalkanes		
1,4-Dimethylcyclohexane	589-90-2	124
1-Methyl-4-methylethylcyclohexane (<i>cis/trans</i>)	6069-98-3/1678-82-6	167
Cyclohexane	110-82-7	81
Methylcyclohexane	108-87-2	101
Methylcyclopentane	96-37-7	72

Příloha č. 1: Seznam vybraných látek dle ISO 16000-6 (2011) detekovaných ve vnitřním prostředí budov ze stavebních materiálů při odběru vzorku vzduchu ve zkušební komoře – pokračování

ISO 16000-6:2011(E)

Table A.1 (continued)

Chemical compound	CAS No.	Boiling point °C
Terpenes		
β-Caryophyllene	87-44-5	275
α-Pinene	80-56-8	156
β-Pinene	18172-67-3	164
3-Carene	13466-78-9	167
α-Cedrene	469-61-4	262
Camphene	79-92-5	158
Limonene	138-86-3	176
Longifolene	475-20-7	254
Turpentine	8006-64-2	150 to 180
Alcohols		
1-Butanol	71-36-3	118
1-Hexanol	111-27-3	158
1-Octanol	111-87-5	194
1-Pentanol	71-41-0	137
1-Propanol	71-23-8	97
2-Ethyl-1-hexanol	104-76-7	182
2-Methyl-1-propanol (isobutanol)	78-83-1	108
2-Methyl-2-propanol	75-65-0	82
2-Propanol	67-63-0	82
2,6-Di- <i>t</i> -butyl-4-methylphenol (BHT)	128-37-0	265
Cyclohexanol	108-93-0	161
Phenol	108-95-2	182
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol isobutyrate	25265-77-4	254
Glycols and glycol ethers		
1-Methoxy-2-propanol	107-98-2	118
2-Butoxyethanol	111-76-2	171
2-Butoxyethoxyethanol	112-34-5	231
2-Ethoxyethanol	110-80-5	136
2-Methoxyethanol	109-86-4	125
2-Phenoxyethanol	122-99-6	245
3-Phenyl-1-propanol	6180-61-6	235
2-(2-Butoxyethoxy)ethanol	112-34-5	230
Dimethoxyethane	110-71-4	85
Dimethoxymethane	109-87-5	42 ^b
Propylene glycol	57-55-6	189

Příloha č. 1: Seznam vybraných látek dle ISO 16000-6 (2011) detekovaných ve vnitřním prostředí budov ze stavebních materiálů při odběru vzorku vzduchu ve zkušební komoře – pokračování

ISO 16000-6:2011(E)

Table A.1 (continued)

Chemical compound	CAS No.	Boiling point °C
Aldehydes		
2-Butenal	123-73-9	104
2-Decenal	2497-25-8	
2-Ethylhexanal	123-05-7	163
2-Furancarboxaldehyde	98-01-1	162
2-Heptenal (<i>cis/trans</i>)	57266-86-1/18829-55-5	90 to 91 at 50 mmHg
2-Nonenal	2463-53-8	100 to 102 at 16 mmHg
2-Pentenal	1576-87-0	115 to 125
2-Undecenal	1337-83-3	
Acetaldehyde	75-07-0	21 ^b
Benzaldehyde	100-52-7	179
Butanal	123-72-8	76
Decanal	112-31-2	208
Heptanal	111-71-7	153
Hexanal	66-25-1	129
Nonanal	124-19-6	190
Octanal	124-13-0	171
Pentanal	110-62-3	103
Propanal	123-38-6	49 ^p
Ketones		
2-Butanone (methyl ethyl ketone)	78-93-3	80
2-Methylcyclohexanone	583-60-8	163
2-Methylcyclopentanone	1120-72-5	139
3-Methyl-2-butanone	563-80-4	95
4-Methyl-2-pentanone (methyl isobutyl ketone)	108-10-1	117
3,5,5-Trimethylcyclohex-2-enone	78-59-1	214
Acetone	67-64-1	56 ^p
Acetophenone	98-86-2	202
Cyclohexanone	108-94-1	155
Cyclopentanone	120-92-3	130
Halocarbons		
1,1,1,2-Tetrachloroethane	630-20-6	130
1,1,2,2-Tetrachloroethane	79-34-5	146
1,1,1-Trichloroethane	71-55-6	74
1,1,2-Trichloroethane	79-00-5	114
1,2-Dichloroethane	107-06-2	84
1,4-Dichlorobenzene	106-46-7	173

Příloha č. 1: Seznam vybraných látek dle ISO 16000-6 (2011) detekovaných ve vnitřním prostředí budov ze stavebních materiálů při odběru vzorku vzduchu ve zkušební komoře – pokračování

ISO 16000-6:2011(E)

Table A.1 (continued)

Chemical compound	CAS No.	Boiling point °C
Carbon tetrachloride	56-23-5	76
Chlorobenzene	108-90-7	131
Dichloromethane	75-09-2	40 ^b
Tetrachloroethene	127-18-4	121
Trichloroethene	79-01-6	87
Acids		
2,2-Dimethylpropanoic acid	75-98-9	164
Acetic acid	64-19-7	118
Butyric acid	107-92-6	163
Heptanoic acid	111-14-8	223
Hexadecanoic acid	57-10-3	350
Hexanoic acid	142-62-1	202
Isobutyric acid	79-31-2	153
Octanoic acid	124-07-2	240
Pentanoic acid	109-52-4	186
Propanoic acid	79-09-4	141
Esters		
2-Ethoxyethyl acetate	111-15-9	156
2-Ethylhexyl acetate	103-09-3	198
2-Methoxyethyl acetate	110-49-6	145
Butoxyethyl acetate	112-07-2	192
Butyl acetate	123-86-4	126
Butyl formate	592-84-7	107
Ethyl acetate	141-78-6	77
Ethyl acrylate	140-88-5	100
Isobutyl acetate	110-19-0	118
Isopropyl acetate	108-21-4	90
Linalool acetate	115-95-7	220
Methyl acrylate	96-33-3	81
Methyl methacrylate	80-62-6	100
Propyl acetate	109-60-4	102
2,2,4-Trimethylpentanediol diisobutyrate	6846-50-0	281
Vinyl acetate	108-05-4	72 ^b
Dibutyl phthalate	84-74-2	340
Dimethyl phthalate	131-11-3	284

Příloha č. 1: Seznam vybraných látek dle ISO 16000-6 (2011) detekovaných ve vnitřním prostředí budov ze stavebních materiálů při odběru vzorku vzduchu ve zkušební komoře – pokračování

ISO 16000-6:2011(E)

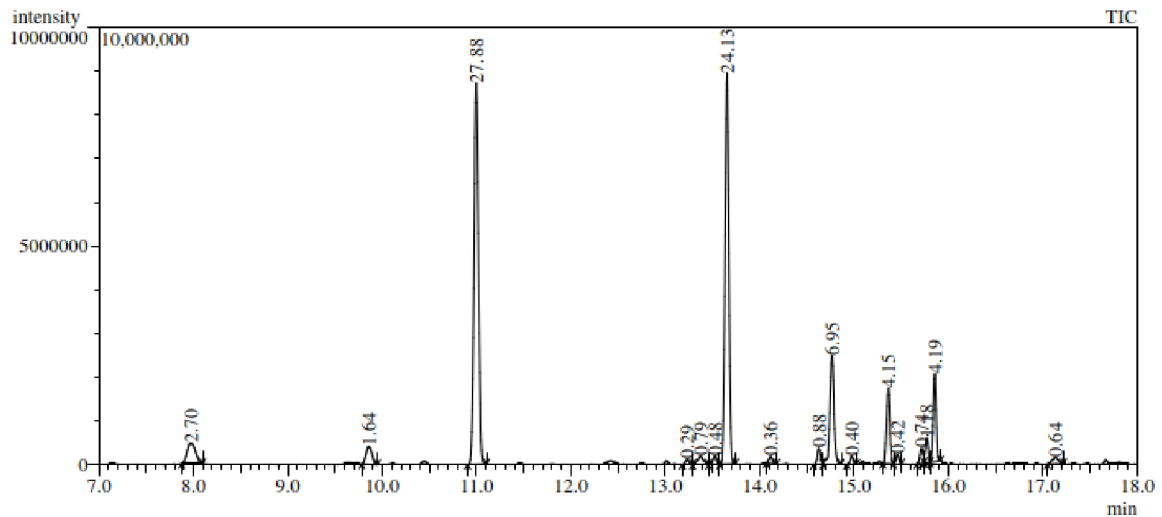
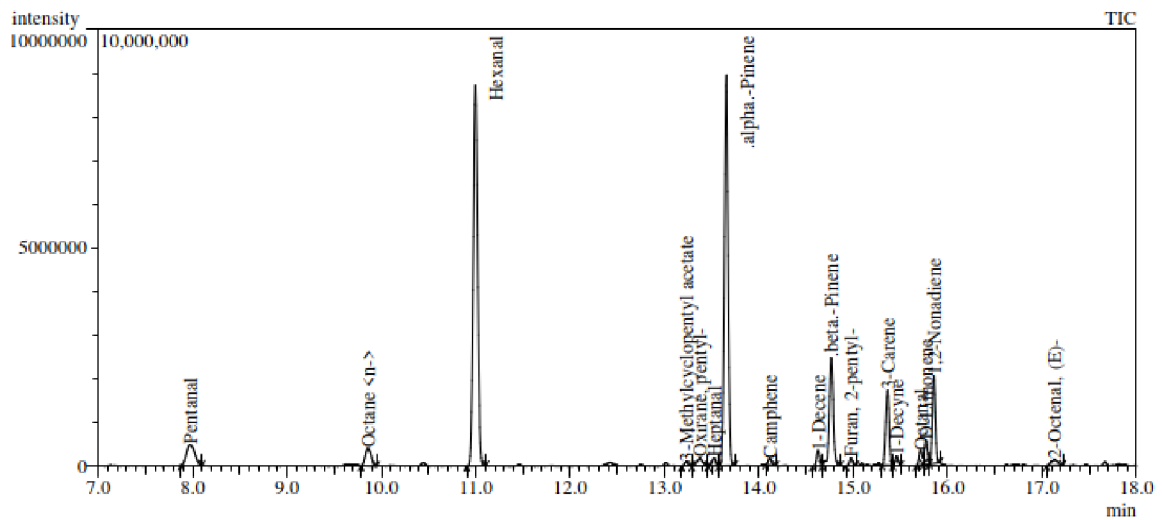
Table A.1 (continued)

Chemical compound	CAS No.	Boiling point °C
Other		
1,4-Dioxane	123-91-1	101
1-Methyl-2-pyrrolidinone	872-50-4	202
2-Pentylfuran	3777-69-3	>120
Aniline	62-53-3	184
Caprolactam	105-60-2	267
Indene	95-13-6	182
Nitrobenzene	98-95-3	211
Pyridine	110-86-1	116
Tetrahydrofuran	109-99-9	67 ^b
NOTE 1 Safe sampling volumes for organic vapours are given in Annex B.		
NOTE 2 When analysing VOCs eluting before <i>n</i> -hexane, the complementary sorbents given in ISO 16017-1 can be used.		
^a Value of 1-phenylcyclohexene.		
^b Compounds with boiling points below that of hexane are not retained quantitatively by Tenax TA [®] when using the sampling tube size and sampling volumes recommended in this part of ISO 16000.		

Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor

**Exsikátor 1
3. den
OSB bez modifikace**

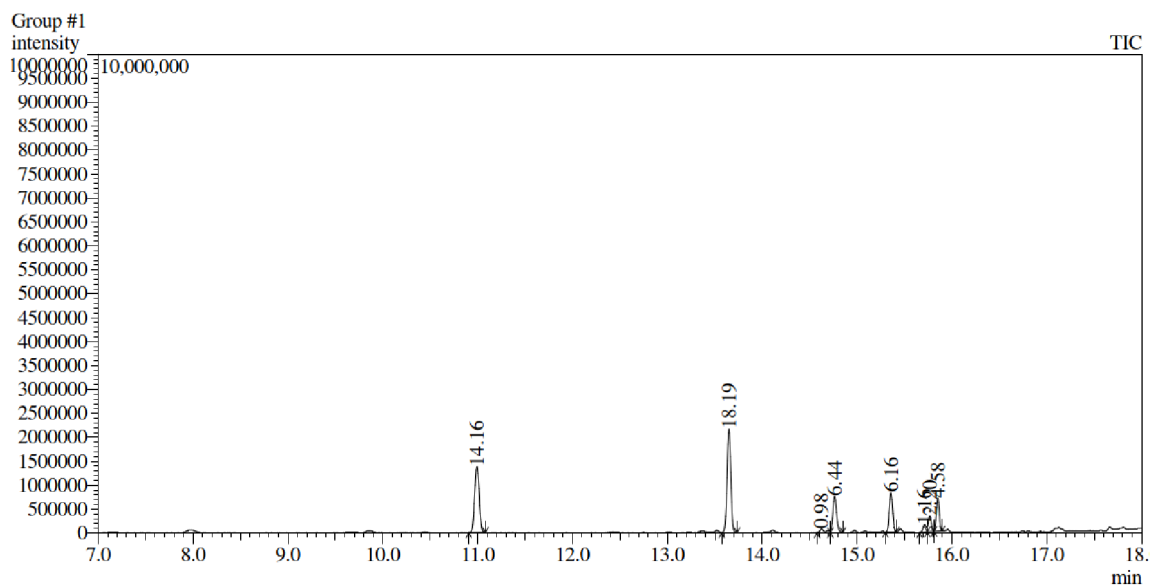
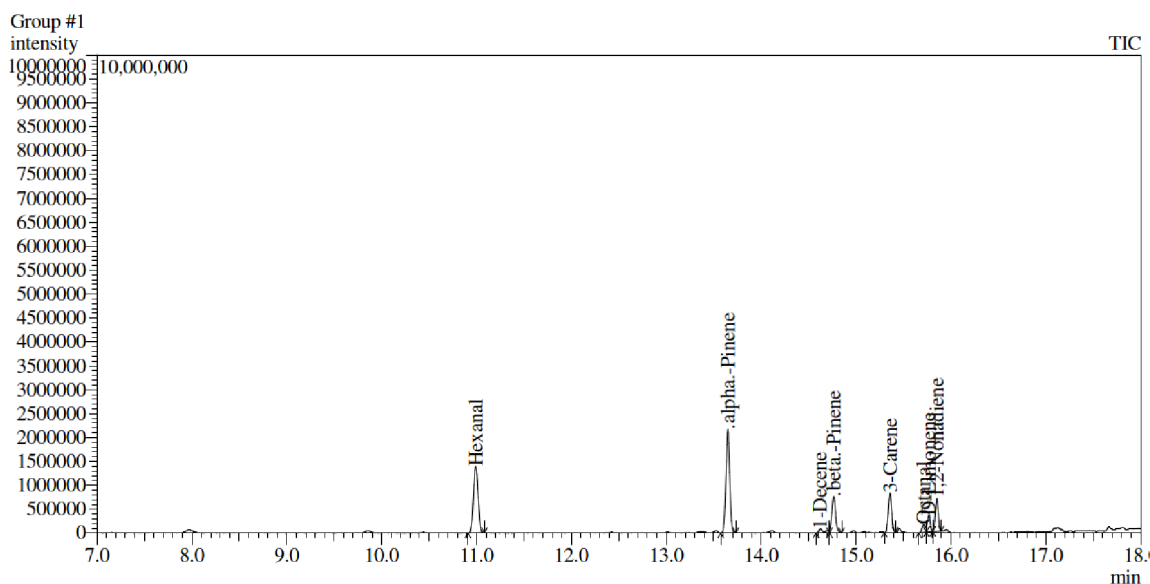
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.029	15087331	14.50	7524362	21.25	2.01	Carbamic acid, monoammonium salt
2	2.215	7989003	7.68	739610	2.09	10.80	Pentane
3	7.975	2808602	2.70	462890	1.31	6.07	Pentanal
4	9.859	1703950	1.64	400314	1.13	4.26	Octane <n->
5	10.998	29006988	27.88	8712777	24.61	3.33	Hexanal
6	13.232	306448	0.29	106811	0.30	2.87	3-Methylcyclopentyl acetate
7	13.376	827223	0.79	184980	0.52	4.47	Oxirane, pentyl-
8	13.525	500020	0.48	189952	0.54	2.63	Heptanal
9	13.654	25109677	24.13	8939585	25.25	2.81	.alpha.-Pinene
10	14.117	377892	0.36	150247	0.42	2.52	Camphene
11	14.629	911203	0.88	358418	1.01	2.54	1-Decene
12	14.767	7235336	6.95	2473817	6.99	2.92	.beta.-Pinene
13	14.976	411423	0.40	181258	0.51	2.27	Furan, 2-pentyl-
14	15.363	4315718	4.15	1720376	4.86	2.51	3-Carene
15	15.460	439992	0.42	210440	0.59	2.09	1-Decyne
16	15.715	772623	0.74	337243	0.95	2.29	Octanal
17	15.770	1227930	1.18	556716	1.57	2.21	D-Limonene
18	15.855	4356731	4.19	2007206	5.67	2.17	1,2-Nonadiene
19	17.132	667326	0.64	146858	0.41	4.54	2-Octenal, (E)-
		104055416	100.00	35403860	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 2
3. den
Broušený povrch OSB

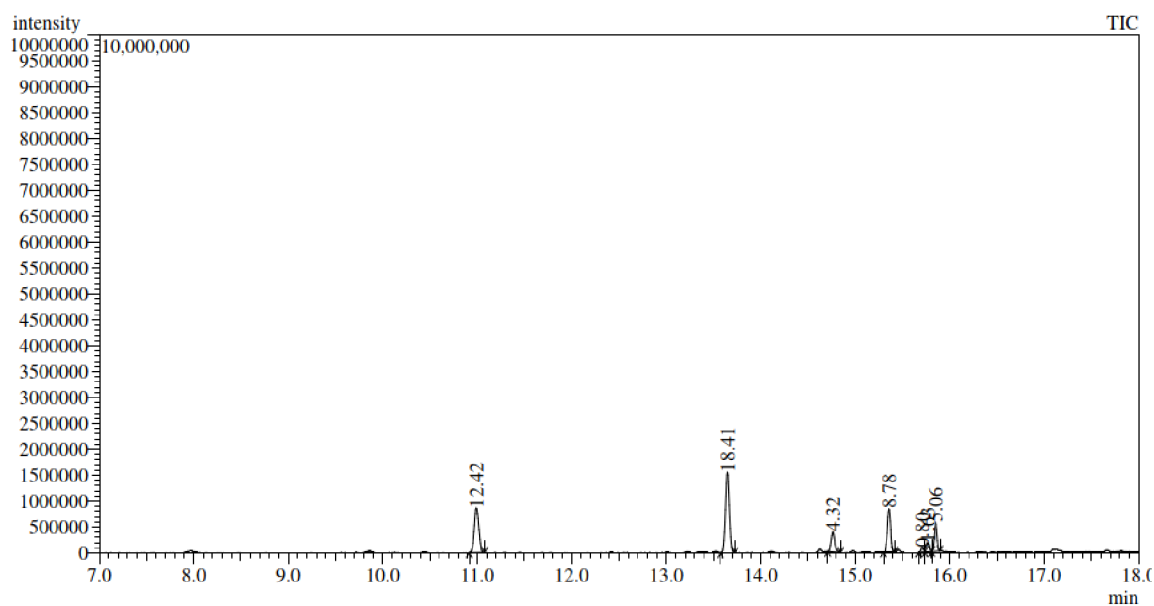
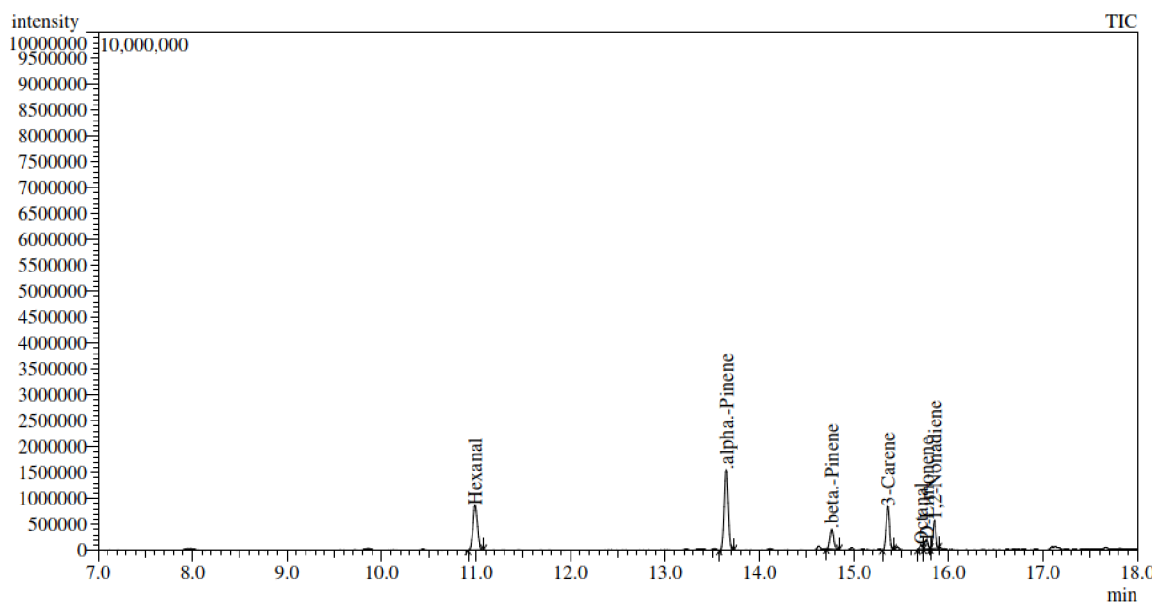
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.030	11516759	34.63	6583462	48.63	1.75	Carbon dioxide
2	10.993	4709643	14.16	1381072	10.20	3.41	Hexanal
3	13.650	6049395	18.19	2162147	15.97	2.80	.alpha.-Pinene
4	14.620	325561	0.98	75648	0.56	4.30	1-Decene
5	14.766	2141247	6.44	758461	5.60	2.82	.beta.-Pinene
6	15.360	2049952	6.16	826767	6.11	2.48	3-Carene
7	15.710	387261	1.16	153938	1.14	2.52	Octanal
8	15.767	731735	2.20	330780	2.44	2.21	D-Limonene
9	15.852	1524382	4.58	688996	5.09	2.21	1,2-Nonadiene
10	18.785	1461801	4.40	161871	1.20	9.03	[1,1':3',1"-Terphenyl]-2'-ol
11	18.945	582831	1.75	112323	0.83	5.19	[1,1':3',1"-Terphenyl]-2'-ol
12	19.089	1774313	5.34	303504	2.24	5.85	[1,1':3',1"-Terphenyl]-2'-ol
		33254880	100.00	13538969	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 3
3. den
6% kyselina citronová

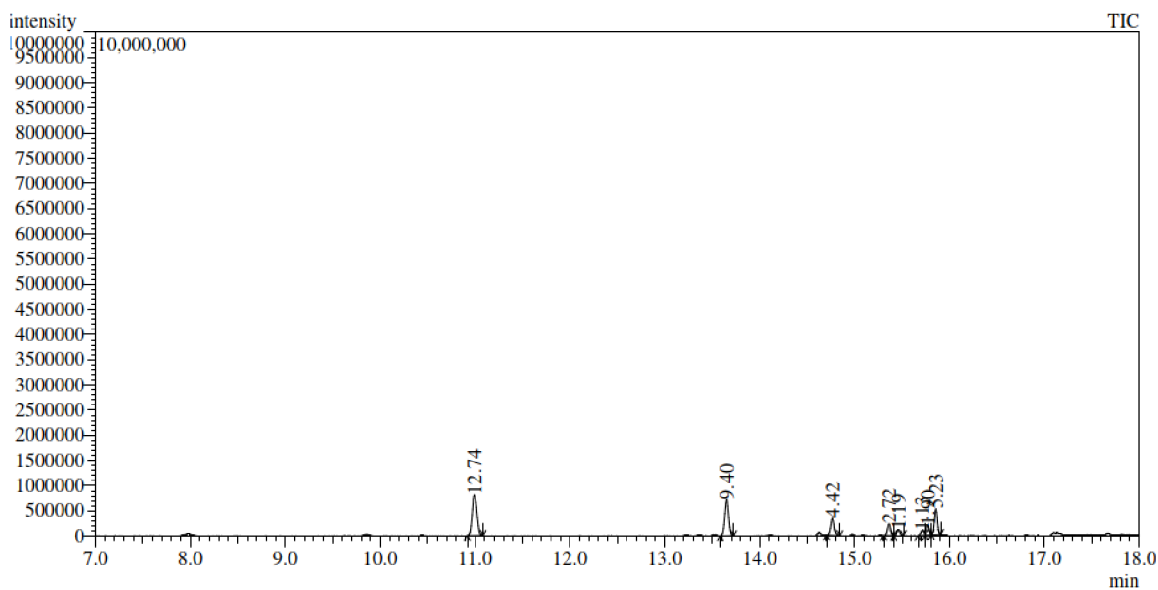
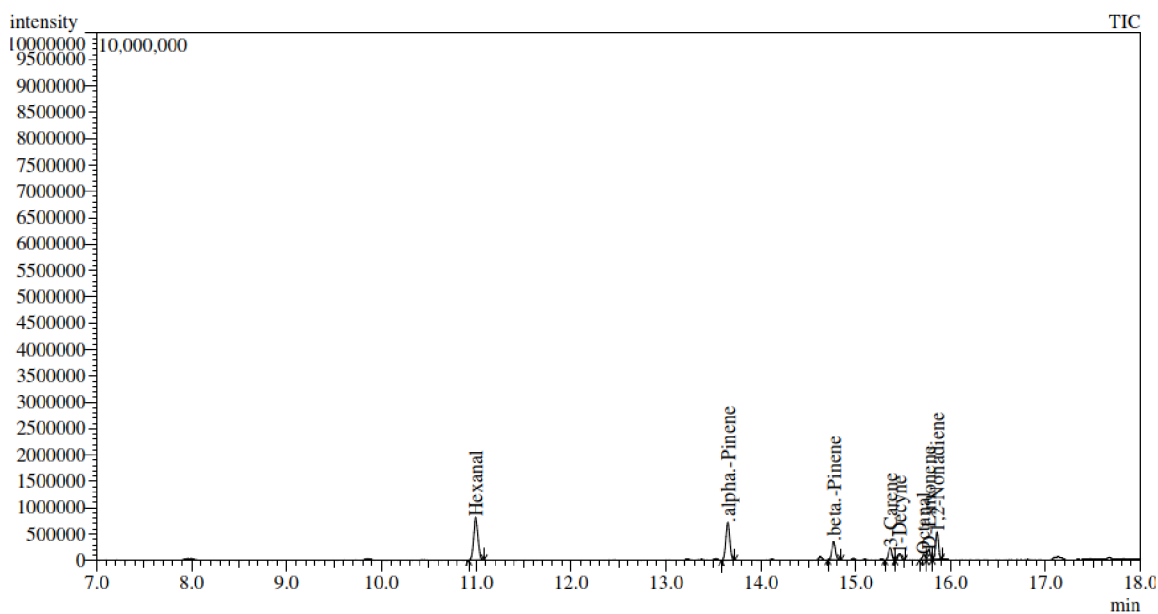
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.029	11534007	48.58	6478845	59.40	1.78	Carbamic acid, monoammonium salt
2	10.992	2947553	12.42	860724	7.89	3.42	Hexanal
3	13.650	4371533	18.41	1551495	14.23	2.82	.alpha.-Pinene
4	14.765	1025136	4.32	377444	3.46	2.72	.beta.-Pinene
5	15.362	2084758	8.78	832588	7.63	2.50	3-Carene
6	15.710	190059	0.80	77435	0.71	2.45	Octanal
7	15.769	386863	1.63	175509	1.61	2.20	D-Limonene
8	15.854	1201779	5.06	552252	5.06	2.18	1,2-Nonadiene
		23741688	100.00	10906292	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 4
3. den
6% kyselina vinná

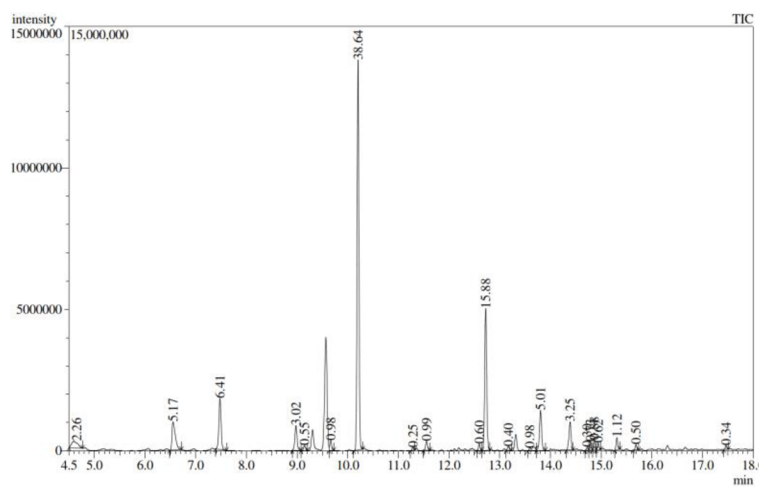
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.035	13049252	61.26	6836300	69.47	1.91	Carbamic acid, monoammonium salt
2	10.995	2714320	12.74	812851	8.26	3.34	Hexanal
3	13.653	2002116	9.40	715099	7.27	2.80	.alpha.-Pinene
4	14.768	940706	4.42	345486	3.51	2.72	.beta.-Pinene
5	15.364	580373	2.72	235564	2.39	2.46	3-Carene
6	15.462	254206	1.19	117055	1.19	2.17	1-Decyne
7	15.710	240695	1.13	84672	0.86	2.84	Octanal
8	15.772	405553	1.90	186267	1.89	2.18	D-Limonene
9	15.857	1114744	5.23	507455	5.16	2.20	1,2-Nonadiene
		21301965	100.00	9840749	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

**Zkušební komora
3. den
6% kyselina citronová**

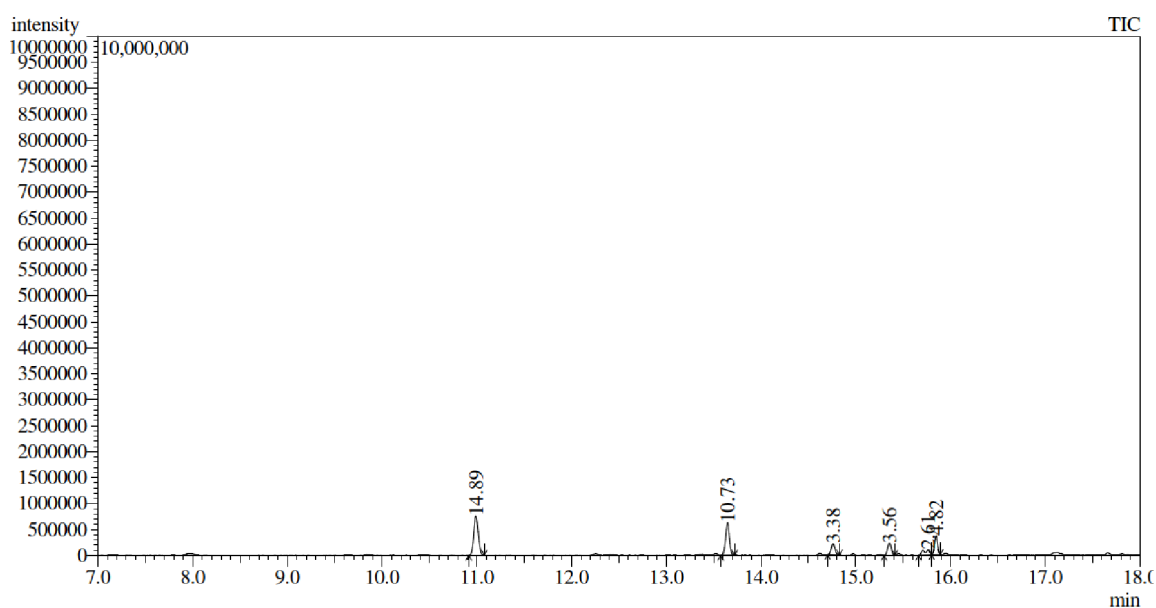
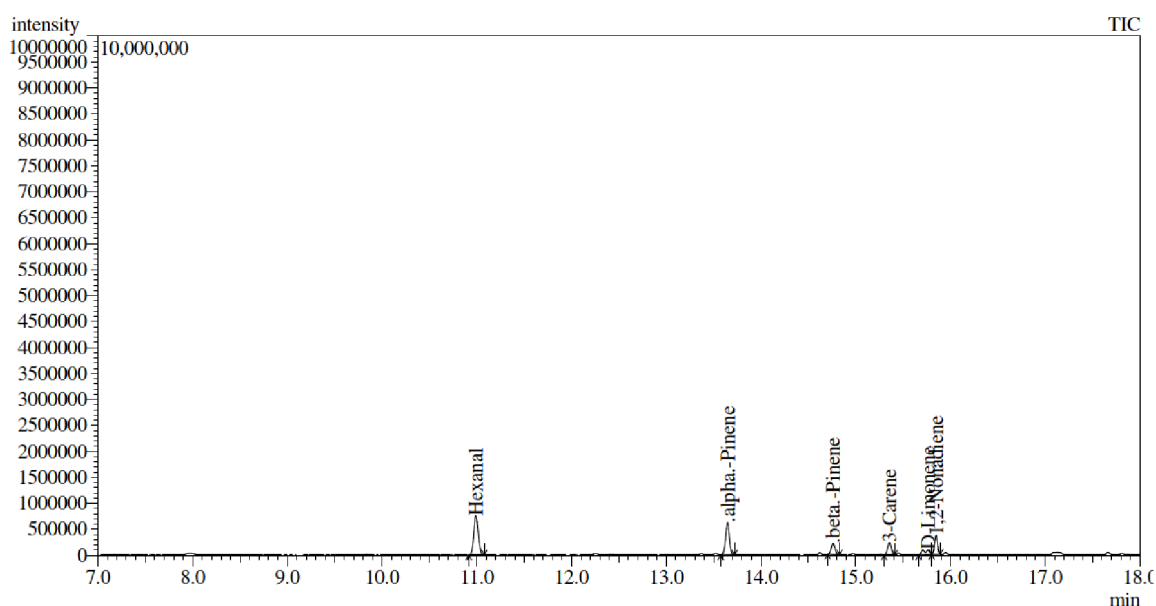
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	2.740	9698163	11.12	1184282	4.02	8.19	Acetone
2	4.590	1975350	2.26	228844	0.78	8.63	Butane, 2-methyl-3-(methylthio)-
3	6.555	4513764	5.17	994319	3.37	4.54	Acetic acid
4	7.480	5593056	6.41	1801626	6.11	3.10	Pentanal
5	8.979	2636359	3.02	879792	2.98	3.00	Toluene
6	9.148	478893	0.55	171985	0.58	2.78	Octane <n->
7	9.667	855808	0.98	353377	1.20	2.42	1-Pentanol
8	10.204	33710654	38.64	13795570	46.79	2.44	Hexanal
9	11.287	217166	0.25	93170	0.32	2.33	Propanoic acid, 2,2-dimethyl-
10	11.556	860178	0.99	324306	1.10	2.65	p-Xylene
11	12.598	527214	0.60	228396	0.77	2.31	Heptanal
12	12.724	13858960	15.88	5017200	17.02	2.76	.alpha.-Pinene
13	13.173	351142	0.40	138272	0.47	2.54	Bicyclo[2.2.1]heptane, 2,2-dimethyl-3-methyl-
14	13.590	857204	0.98	90127	0.31	9.51	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-
15	13.806	4373620	5.01	1423605	4.83	3.07	.beta.-Pinene
16	14.390	2832391	3.25	1002658	3.40	2.82	3-Carene
17	14.725	264790	0.30	102887	0.35	2.57	Octanal
18	14.790	634296	0.73	286167	0.97	2.22	D-Limonene
19	14.866	769862	0.88	355114	1.20	2.17	1,2-Nonadiene
20	14.944	540573	0.62	240333	0.82	2.25	Hexanoic acid
21	15.314	974788	1.12	434906	1.47	2.24	Dichlorprop 2-ethylhexyl ester
22	15.690	435364	0.50	200695	0.68	2.17	Undecane <n->
23	17.467	292980	0.34	139288	0.47	2.10	Dodecane <n->
		87252575	100.00	29486919	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 1
7. den
OSB bez modifikace

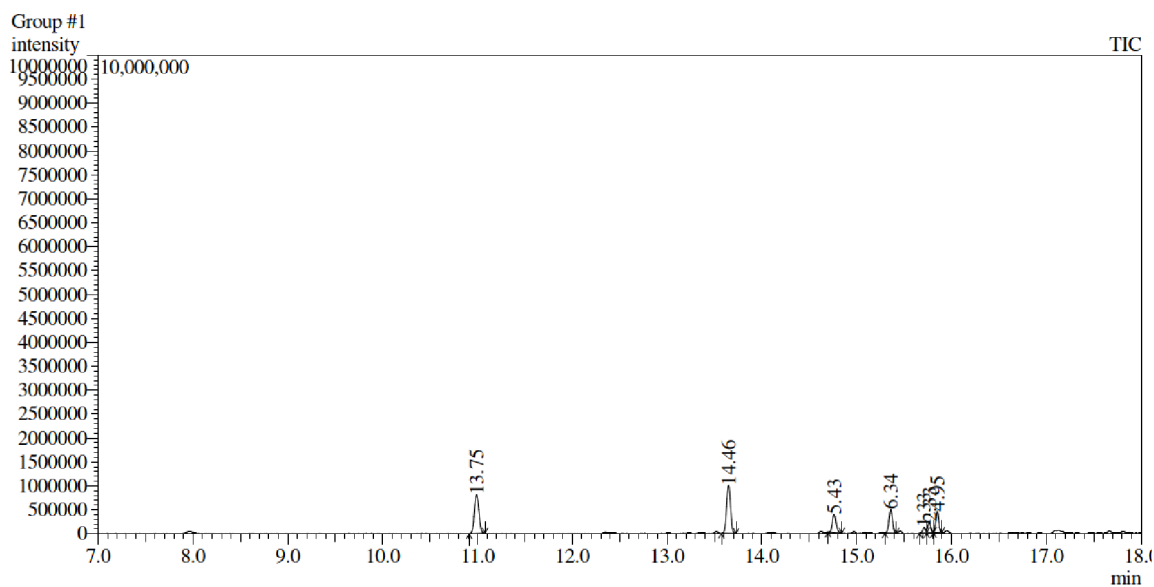
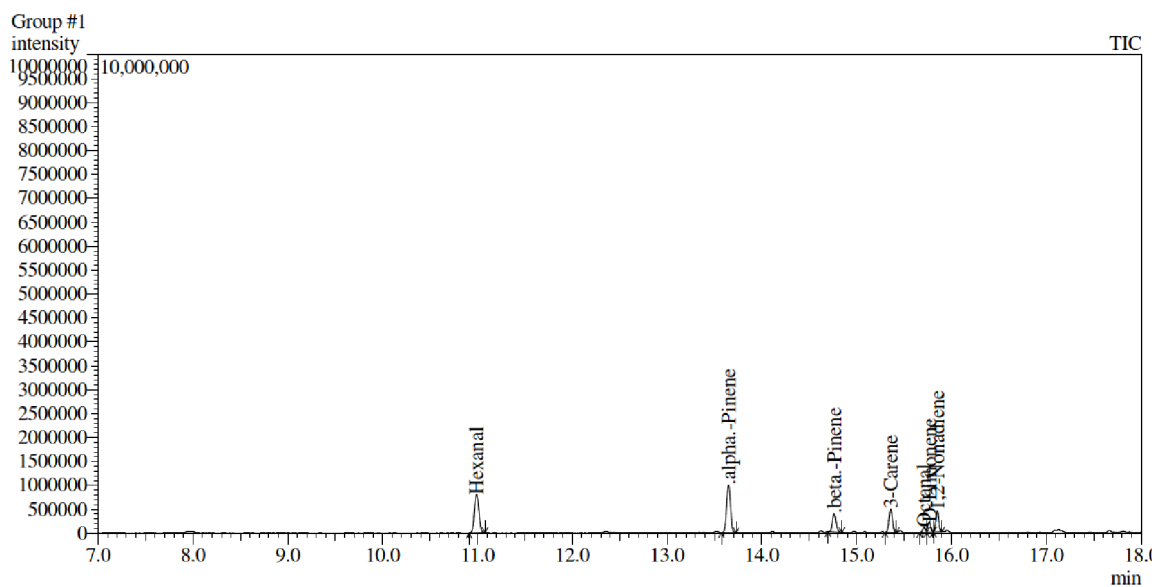
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.029	9945096	60.01	6016467	72.56	1.65	Carbon dioxide
2	10.992	2467338	14.89	756898	9.13	3.26	Hexanal
3	13.648	1778231	10.73	622337	7.51	2.86	.alpha.-Pinene
4	14.762	559439	3.38	206396	2.49	2.71	.beta.-Pinene
5	15.357	590304	3.56	229027	2.76	2.58	3-Carene
6	15.765	433105	2.61	94689	1.14	4.57	D-Limonene
7	15.850	799520	4.82	365993	4.41	2.18	1,2-Nonadiene
		16573033	100.00	8291807	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 2
7. den
Broušený povrch OSB

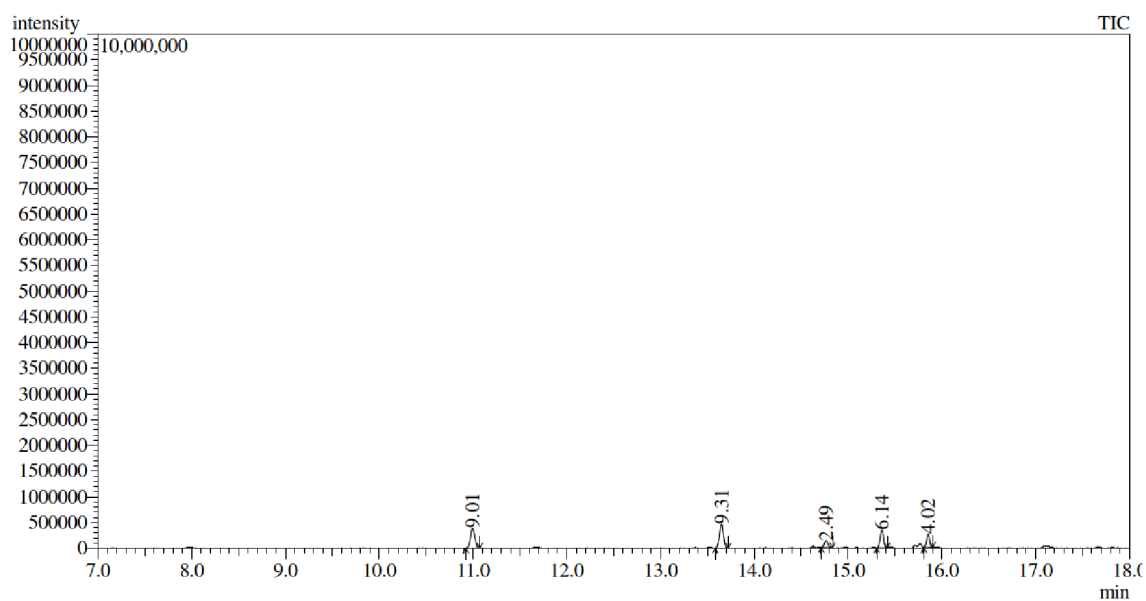
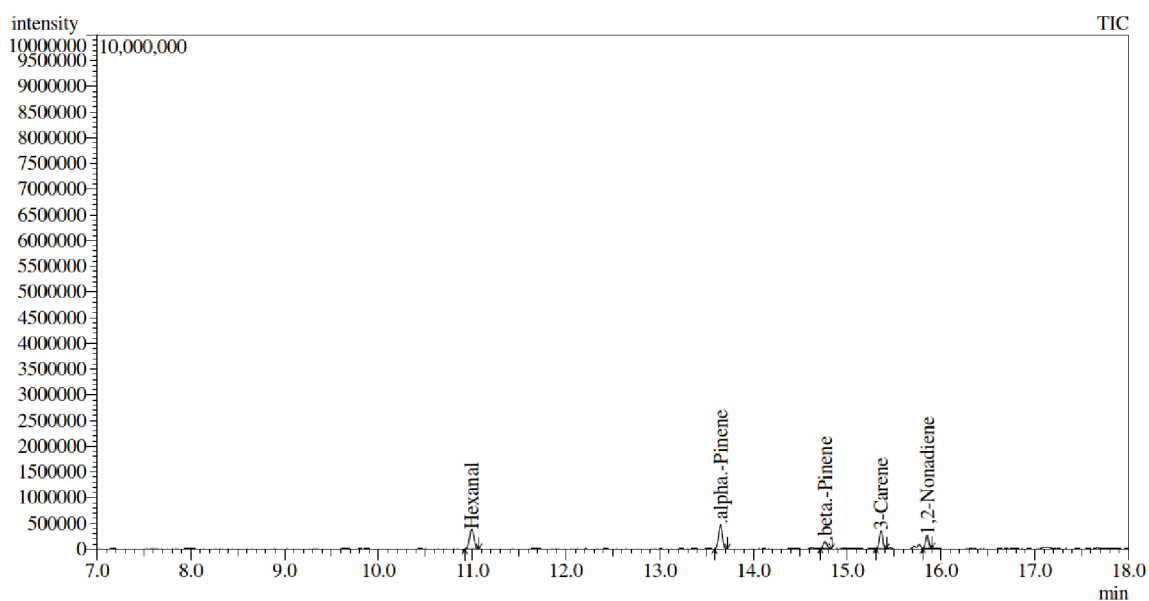
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.026	9934806	51.40	6113257	64.12	1.63	Carbamic acid, monoammonium salt
2	10.992	2658397	13.75	801880	8.41	3.32	Hexanal
3	13.650	2795507	14.46	994905	10.44	2.81	.alpha.-Pinene
4	14.764	1048779	5.43	379562	3.98	2.76	.beta.-Pinene
5	15.360	1225315	6.34	492133	5.16	2.49	3-Carene
6	15.710	258023	1.33	105032	1.10	2.46	Octanal
7	15.768	450344	2.33	208297	2.18	2.16	D-Limonene
8	15.852	957504	4.95	438762	4.60	2.18	1,2-Nonadiene
		19328675	100.00	9533828	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 3
7. den
6% kyselina citronová

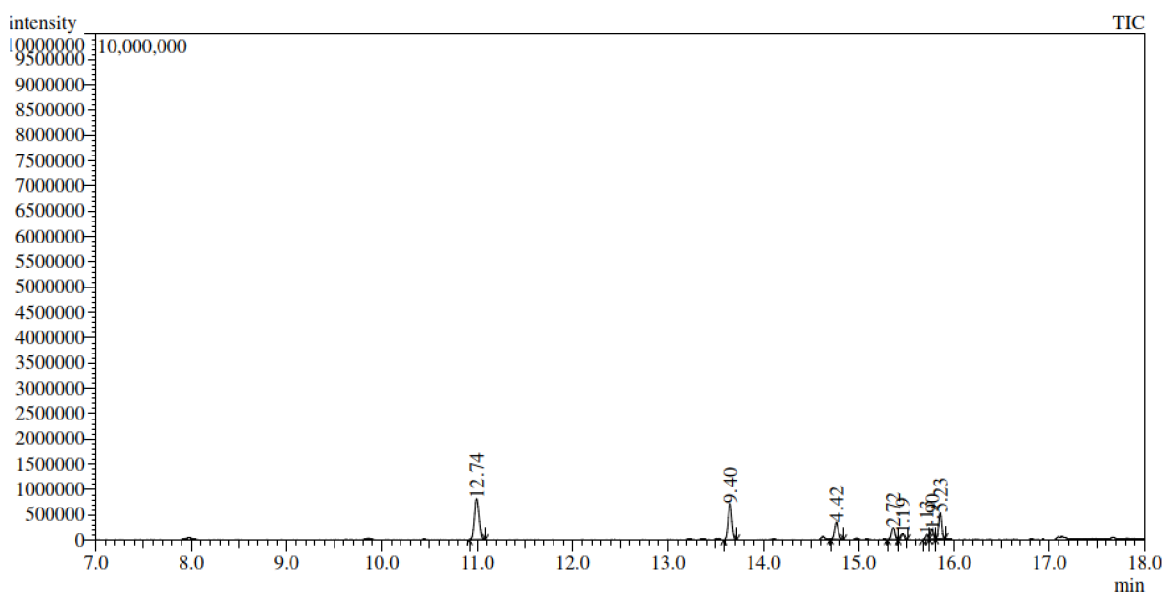
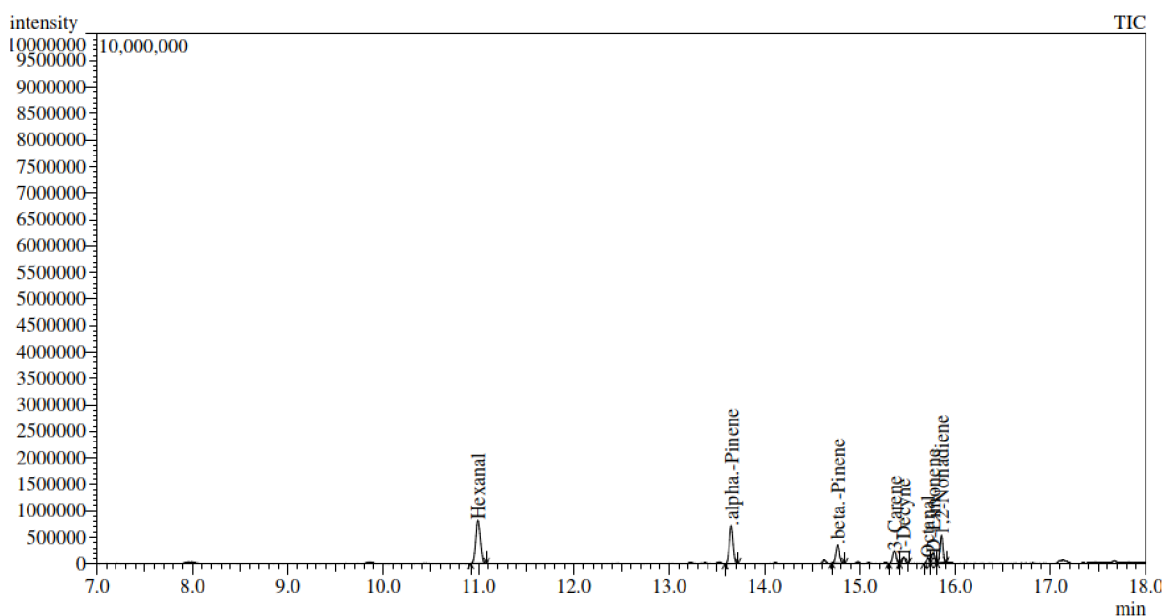
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.027	9678036	69.03	5812559	78.68	1.67	Carbamic acid, monoammonium salt
2	10.995	1262847	9.01	383200	5.19	3.30	Hexanal
3	13.652	1304736	9.31	461122	6.24	2.83	.alpha.-Pinene
4	14.766	349739	2.49	130236	1.76	2.69	.beta.-Pinene
5	15.362	861290	6.14	344122	4.66	2.50	3-Carene
6	15.855	563456	4.02	256436	3.47	2.20	1,2-Nonadiene
		14020104	100.00	7387675	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 4
7. den
6% kyselina vinná

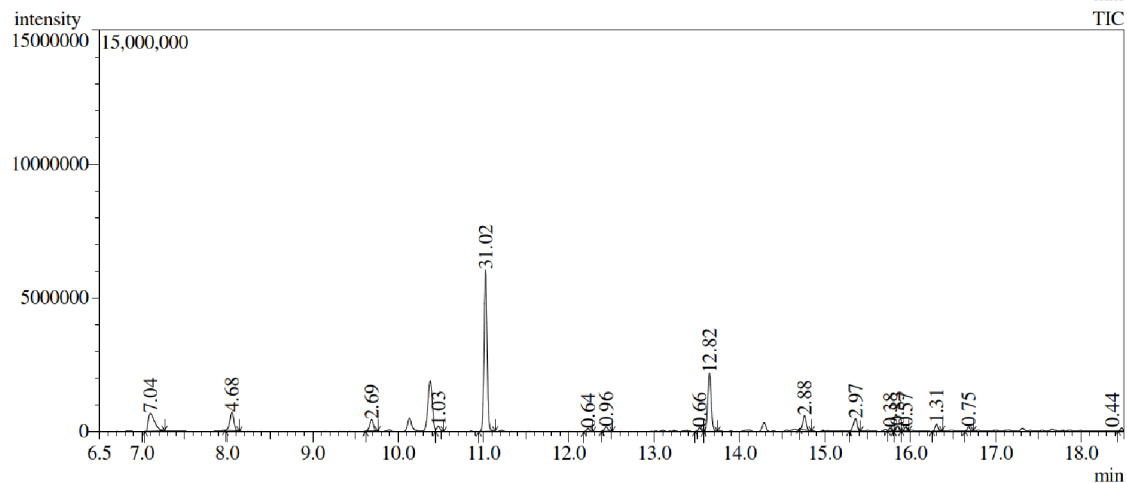
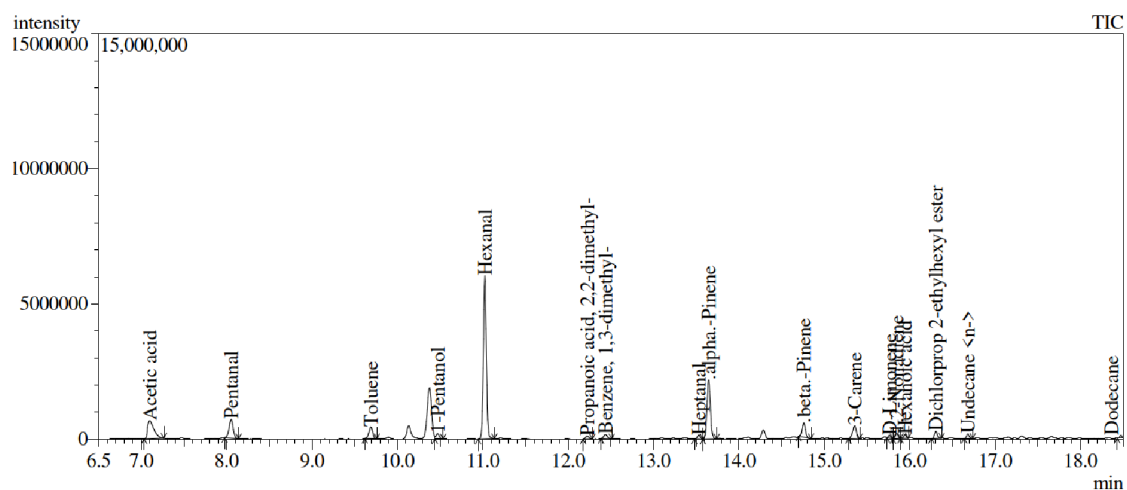
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.035	13049252	61.26	6836300	69.47	1.91	Carbamic acid, monoammonium salt
2	10.995	2714320	12.74	812851	8.26	3.34	Hexanal
3	13.653	2002116	9.40	715099	7.27	2.80	.alpha.-Pinene
4	14.768	940706	4.42	345486	3.51	2.72	.beta.-Pinene
5	15.364	580373	2.72	235564	2.39	2.46	3-Carene
6	15.462	254206	1.19	117055	1.19	2.17	1-Decyne
7	15.710	240695	1.13	84672	0.86	2.84	Octanal
8	15.772	405553	1.90	186267	1.89	2.18	D-Limonene
9	15.857	1114744	5.23	507455	5.16	2.20	1,2-Nonadiene
		21301965	100.00	9840749	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Zkušební komora
7. den
6% kyselina citronová

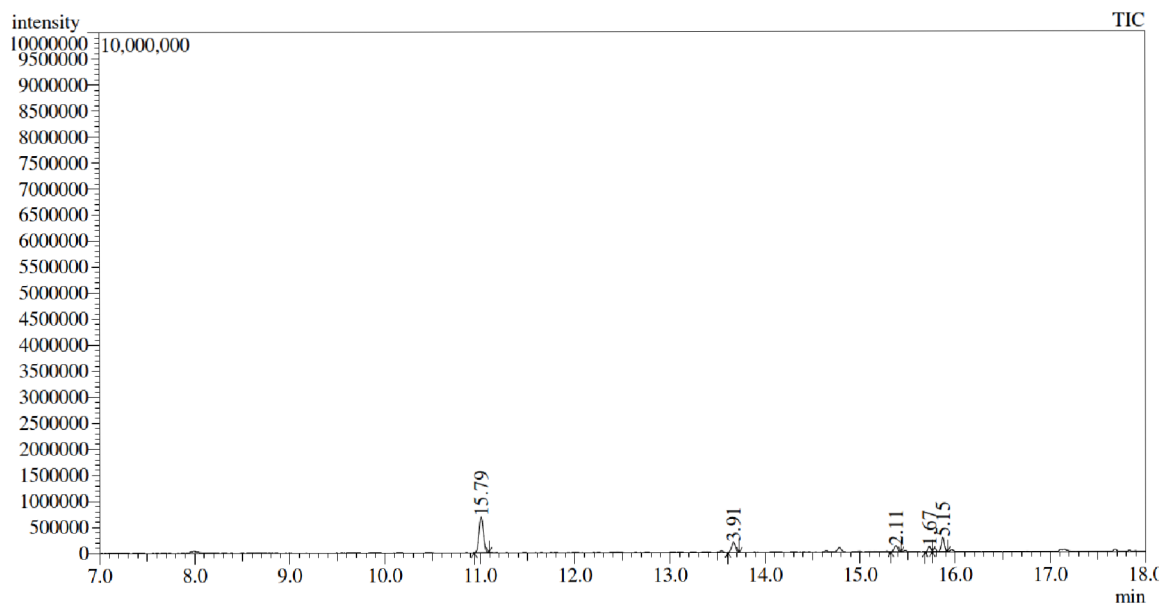
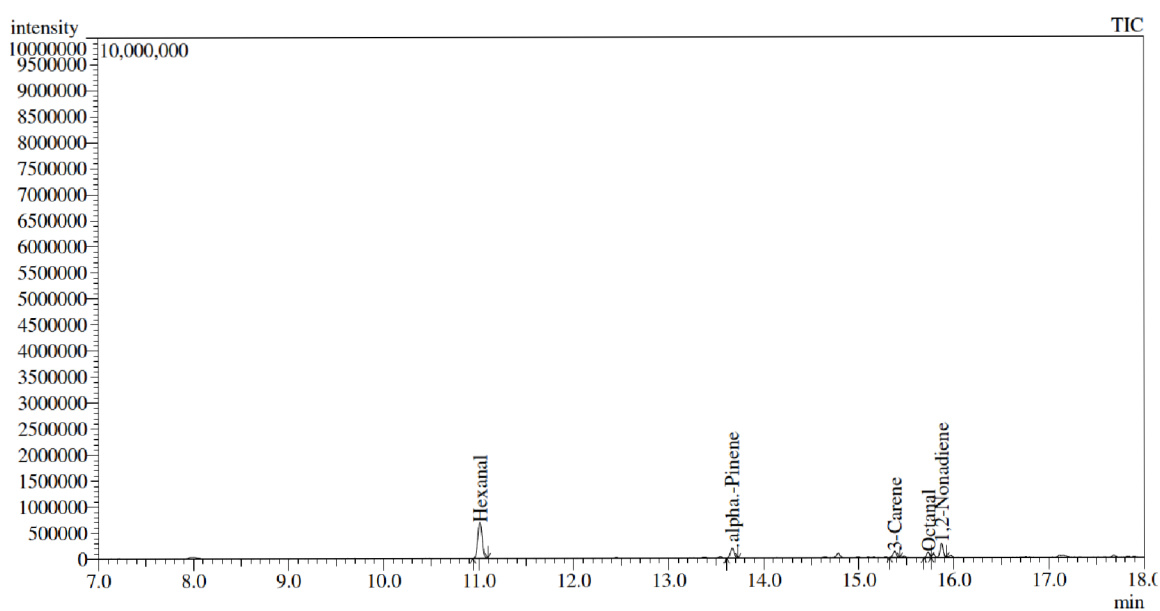
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.022	10239619	21.31	6415067	33.02	1.60	Carbon dioxide
2	2.754	3369780	7.01	454185	2.34	7.42	Acetone
3	7.099	3385096	7.04	671144	3.45	5.04	Acetic acid
4	8.054	2246653	4.68	691331	3.56	3.25	Pentanal
5	9.690	1293599	2.69	431436	2.22	3.00	Toluene
6	10.472	497236	1.03	193811	1.00	2.57	1-Pentanol
7	11.026	14904745	31.02	6031085	31.04	2.47	Hexanal
8	12.224	309309	0.64	113000	0.58	2.74	Propanoic acid, 2,2-dimethyl-
9	12.438	462665	0.96	157238	0.81	2.94	Benzene, 1,3-dimethyl-
10	13.531	315751	0.66	142530	0.73	2.22	Heptanal
11	13.647	6161237	12.82	2178059	11.21	2.83	.alpha.-Pinene
12	14.761	1384653	2.88	528574	2.72	2.62	.beta.-Pinene
13	15.358	1425725	2.97	478196	2.46	2.98	3-Carene
14	15.765	184198	0.38	97132	0.50	1.90	D-Limonene
15	15.849	400012	0.83	181427	0.93	2.20	1,2-Nonadiene
16	15.945	273098	0.57	132222	0.68	2.07	Hexanoic acid
17	16.308	627503	1.31	263351	1.36	2.38	Dichlorprop 2-ethylhexyl ester
18	16.683	360054	0.75	168080	0.87	2.14	Undecane <n->
19	18.476	211266	0.44	100557	0.52	2.10	Dodecane
		48052199	100.00	19428425	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 1
14. den
OSB bez modifikace

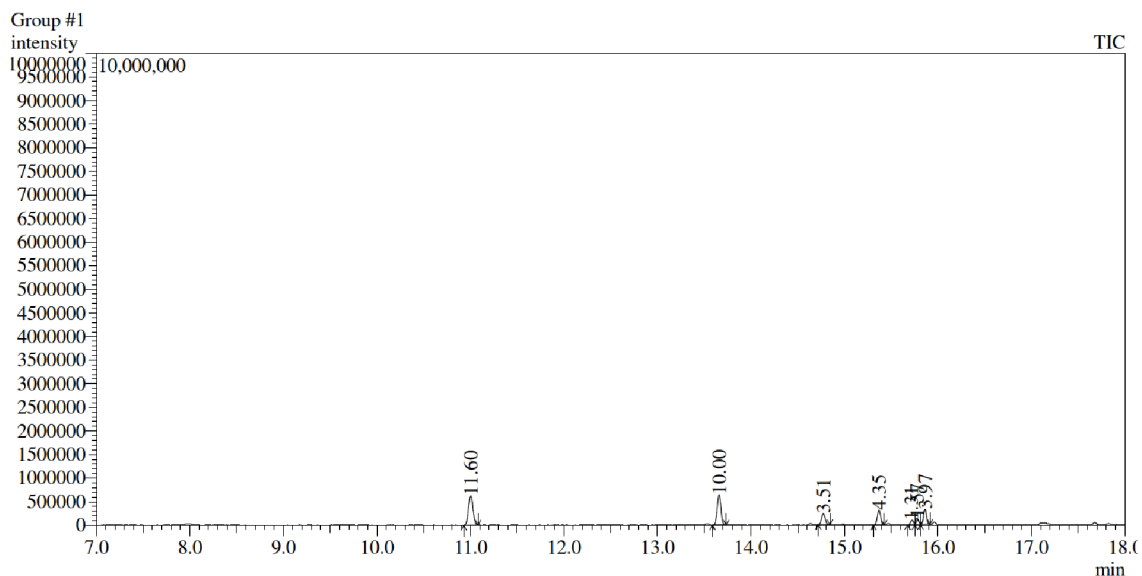
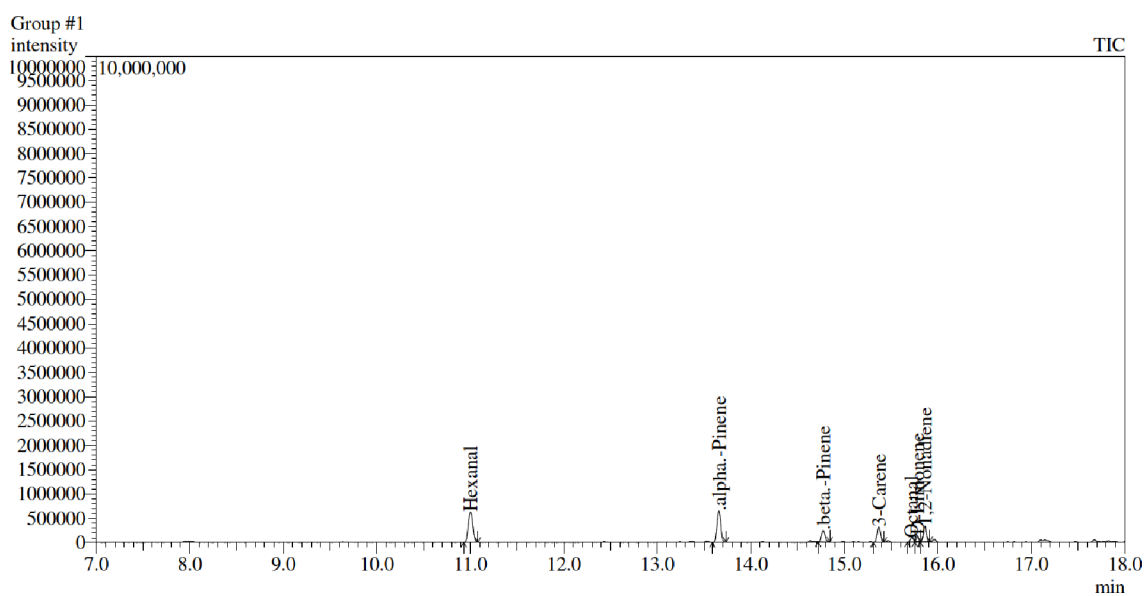
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.028	10040793	71.36	6113638	81.64	1.64	Carbon dioxide
2	11.013	2221852	15.79	688041	9.19	3.23	Hexanal
3	13.667	550586	3.91	193947	2.59	2.84	.alpha.-Pinene
4	15.377	297575	2.11	116122	1.55	2.56	3-Carene
5	15.729	234448	1.67	102745	1.37	2.28	Octanal
6	15.869	724613	5.15	274052	3.66	2.64	1,2-Nonadiene
		14069867	100.00	7488545	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 2
14. den
Broušený povrch OSB

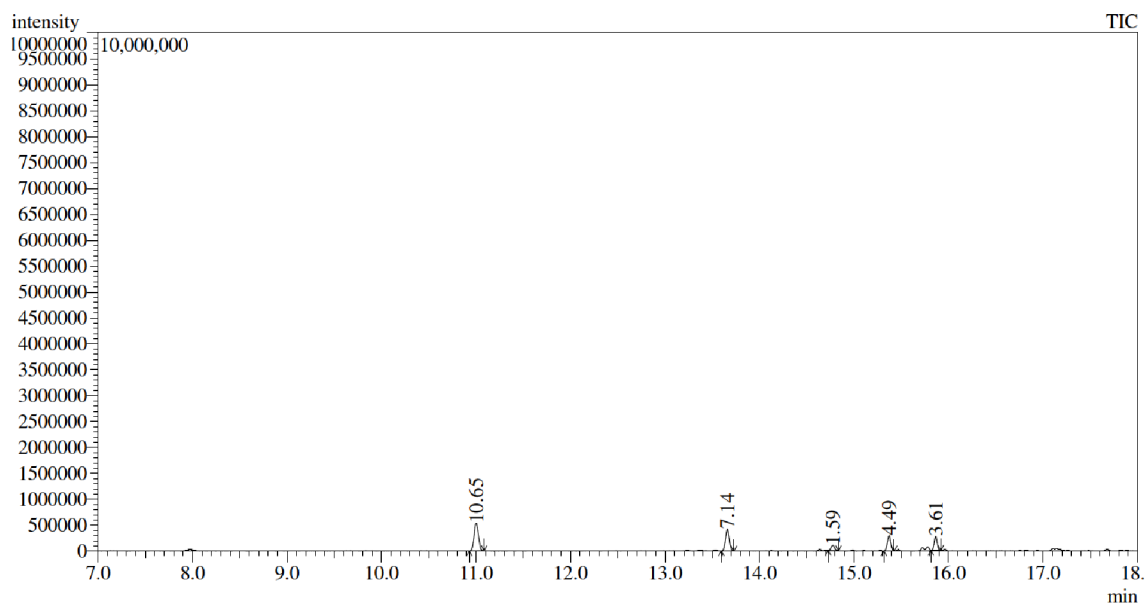
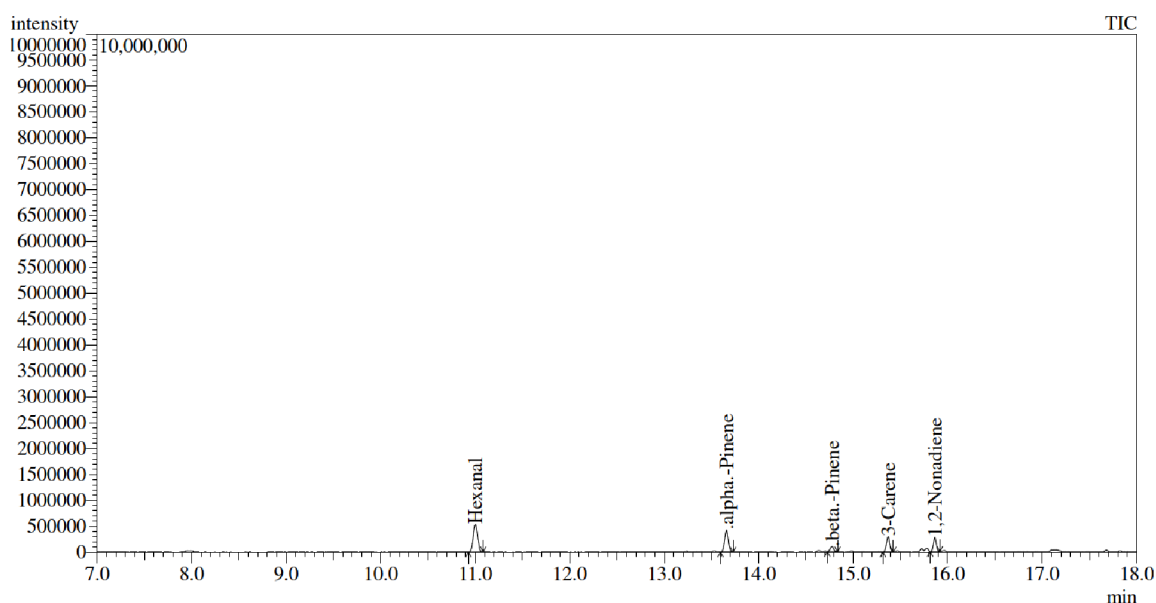
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.031	11463370	63.69	6543944	73.61	1.75	Carbamic acid, monoammonium salt
2	11.002	2088085	11.60	617241	6.94	3.38	Hexanal
3	13.659	1799346	10.00	645006	7.26	2.79	.alpha.-Pinene
4	14.775	631505	3.51	234089	2.63	2.70	.beta.-Pinene
5	15.369	782426	4.35	315746	3.55	2.48	3-Carene
6	15.715	236585	1.31	80681	0.91	2.93	Octanal
7	15.778	282888	1.57	132887	1.49	2.13	D-Limonene
8	15.862	715063	3.97	320759	3.61	2.23	1,2-Nonadiene
		17999268	100.00	8890353	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 3
14. den
6% kyselina citronová

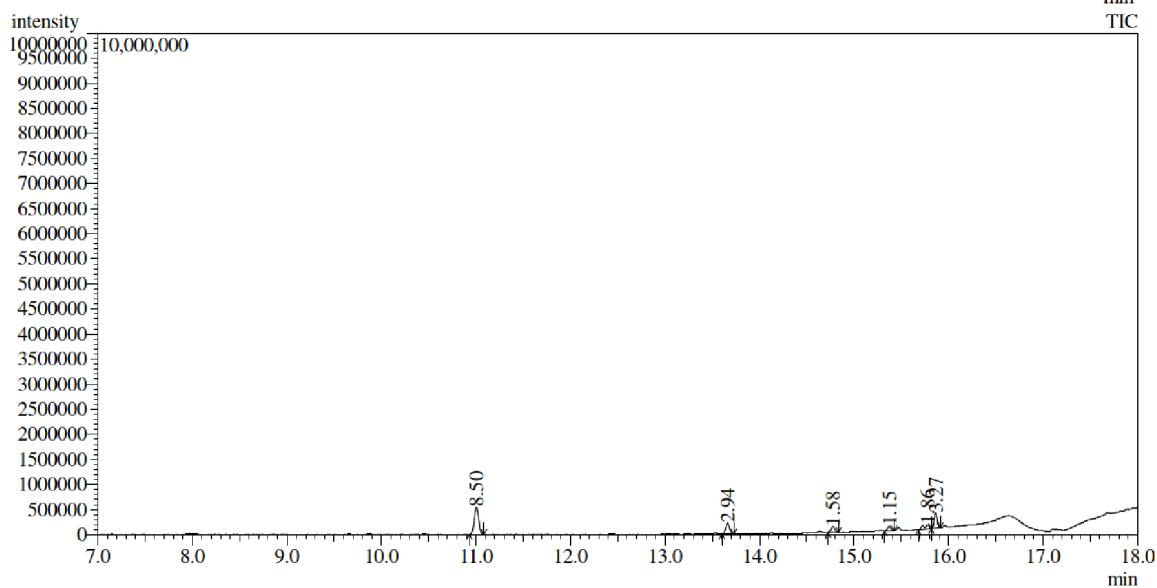
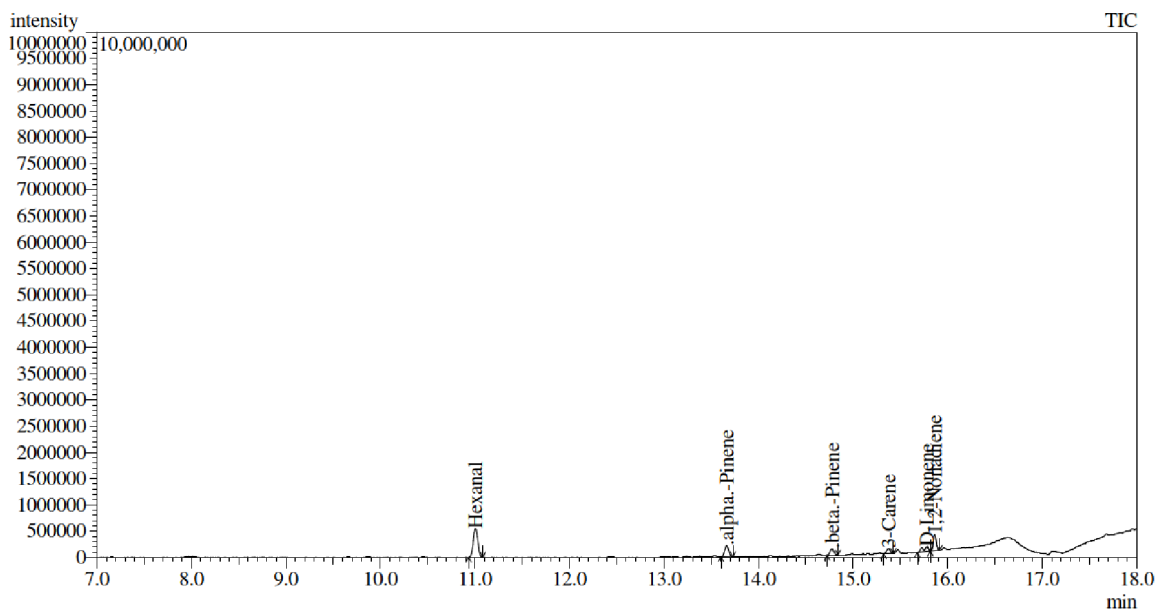
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.029	11816059	72.52	6717660	80.60	1.76	Carbamic acid, monoammonium salt
2	11.002	1735086	10.65	529227	6.35	3.28	Hexanal
3	13.660	1163946	7.14	422073	5.06	2.76	.alpha.-Pinene
4	14.775	259082	1.59	99559	1.19	2.60	.beta.-Pinene
5	15.371	731429	4.49	294944	3.54	2.48	3-Carene
6	15.864	588656	3.61	270751	3.25	2.17	1,2-Nonadiene
		16294258	100.00	8334214	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

**Exsikátor 4
14. den
6% kyselina vinná**

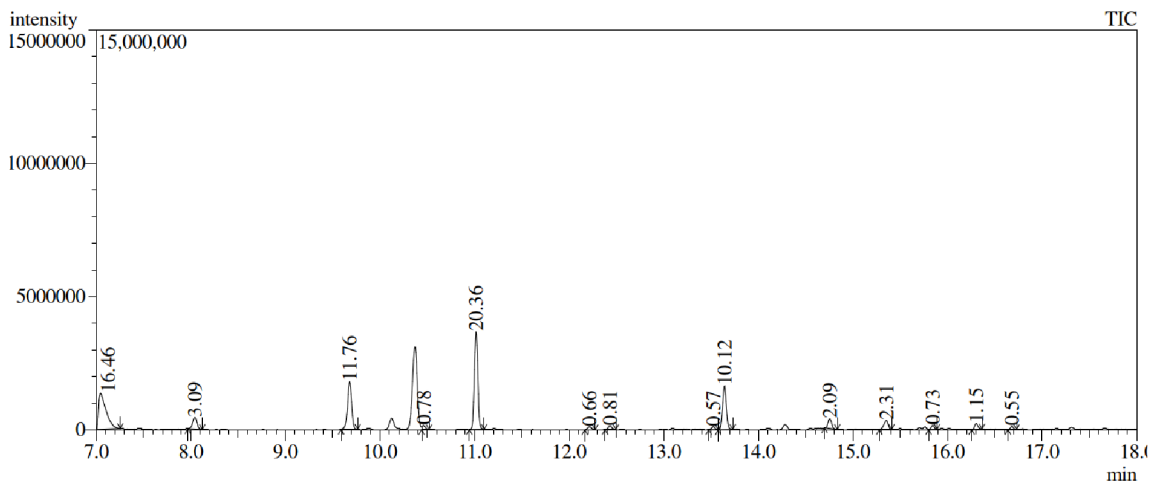
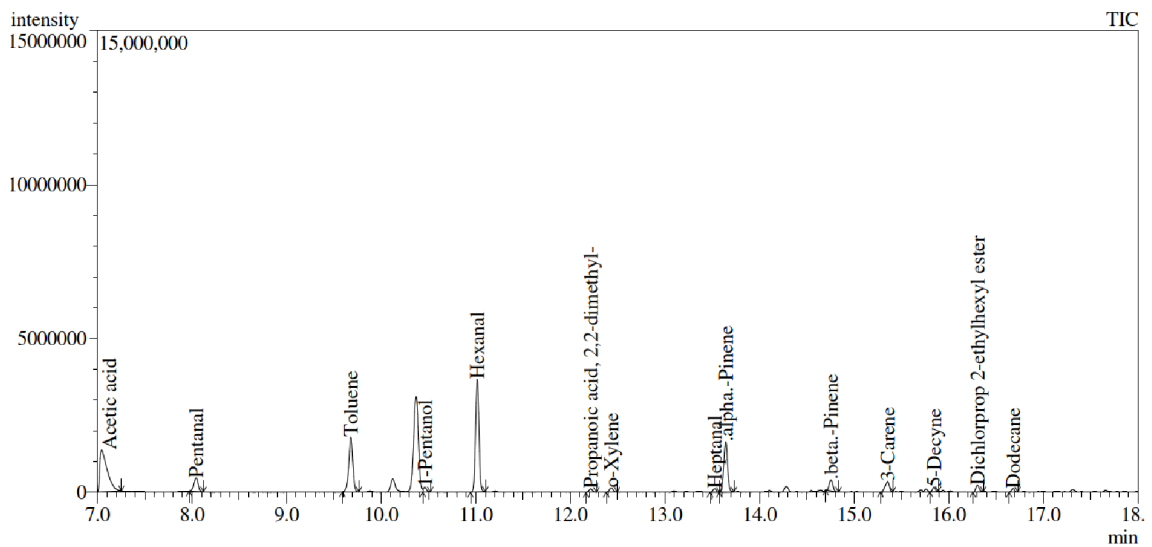
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.030	11015594	53.91	6642084	76.78	1.66	Carbamic acid, monoammonium salt
2	11.007	1736581	8.50	540862	6.25	3.21	Hexanal
3	13.665	601479	2.94	213358	2.47	2.82	.alpha.-Pinene
4	14.778	323346	1.58	118495	1.37	2.73	.beta.-Pinene
5	15.375	235001	1.15	92979	1.07	2.53	3-Carene
6	15.781	380856	1.86	89604	1.04	4.25	D-Limonene
7	15.866	668345	3.27	305730	3.53	2.19	1,2-Nonadiene
8	18.166	4433118	21.70	468089	5.41	9.47	5,10-methano-11H-dibenzo[a,d]cyclohepten-
9	19.378	1037495	5.08	179357	2.07	5.78	Methyl p-(phenylethynyl)cinnamate
		20431815	100.00	8650558	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

**Zkušební komora
14. den
6% kyselina citronová**

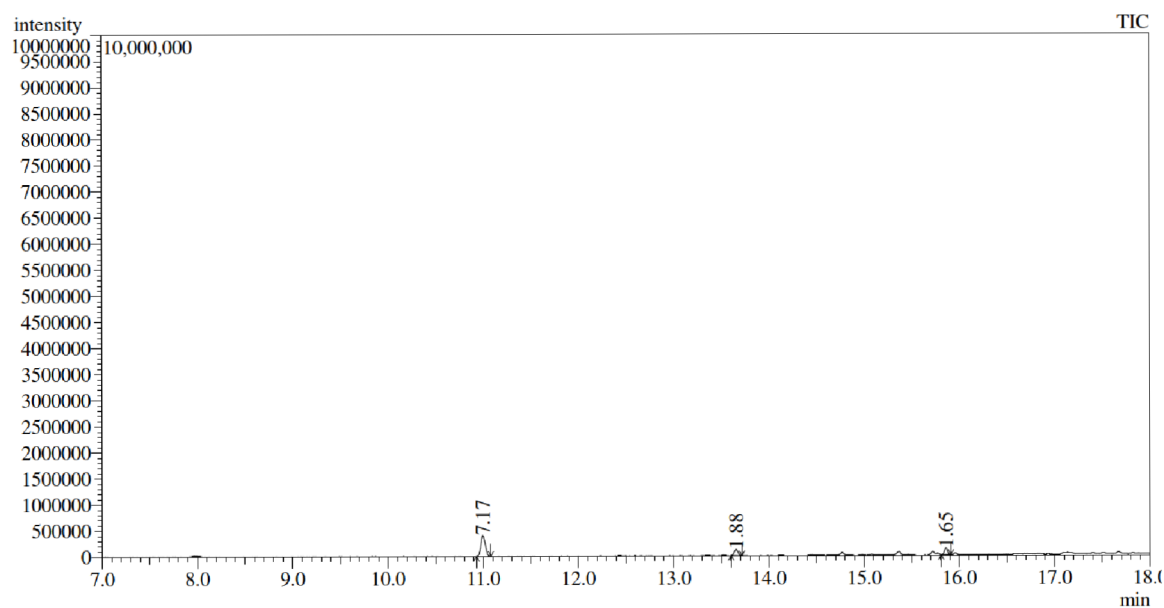
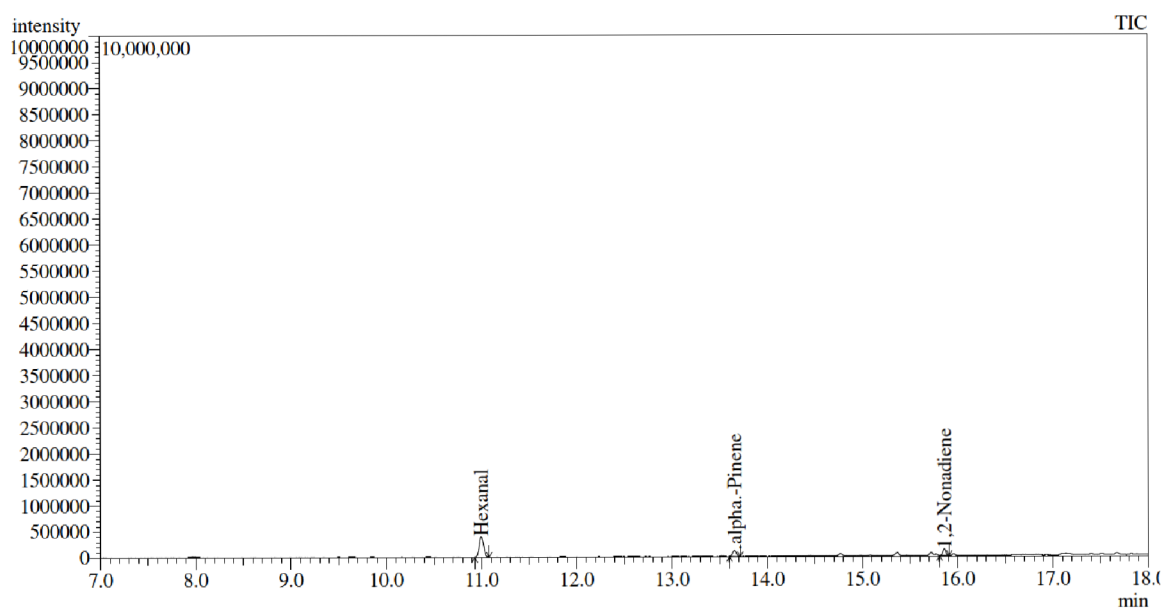
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.021	9339532	20.77	6103375	35.62	1.53	Carbon dioxide
2	2.727	3503452	7.79	456000	2.66	7.68	Acetone
3	7.045	7403630	16.46	1354039	7.90	5.47	Acetic acid
4	8.043	1389991	3.09	437306	2.55	3.18	Pentanal
5	9.680	5290278	11.76	1779266	10.38	2.97	Toluene
6	10.465	352825	0.78	154641	0.90	2.28	1-Pentanol
7	11.016	9157484	20.36	3661956	21.37	2.50	Hexanal
8	12.216	295607	0.66	107425	0.63	2.75	Propanoic acid, 2,2-dimethyl-
9	12.433	363437	0.81	138749	0.81	2.62	o-Xylene
10	13.525	255855	0.57	114036	0.67	2.24	Heptanal
11	13.643	4549773	10.12	1641129	9.58	2.77	.alpha.-Pinene
12	14.756	939784	2.09	360048	2.10	2.61	.beta.-Pinene
13	15.355	1037733	2.31	339737	1.98	3.05	3-Carene
14	15.846	327085	0.73	151249	0.88	2.16	5-Decyne
15	16.304	517023	1.15	219080	1.28	2.36	Dichlorprop 2-ethylhexyl ester
16	16.681	245468	0.55	115652	0.67	2.12	Dodecane
		44968957	100.00	17133688	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 1
28. den
OSB bez modifikace

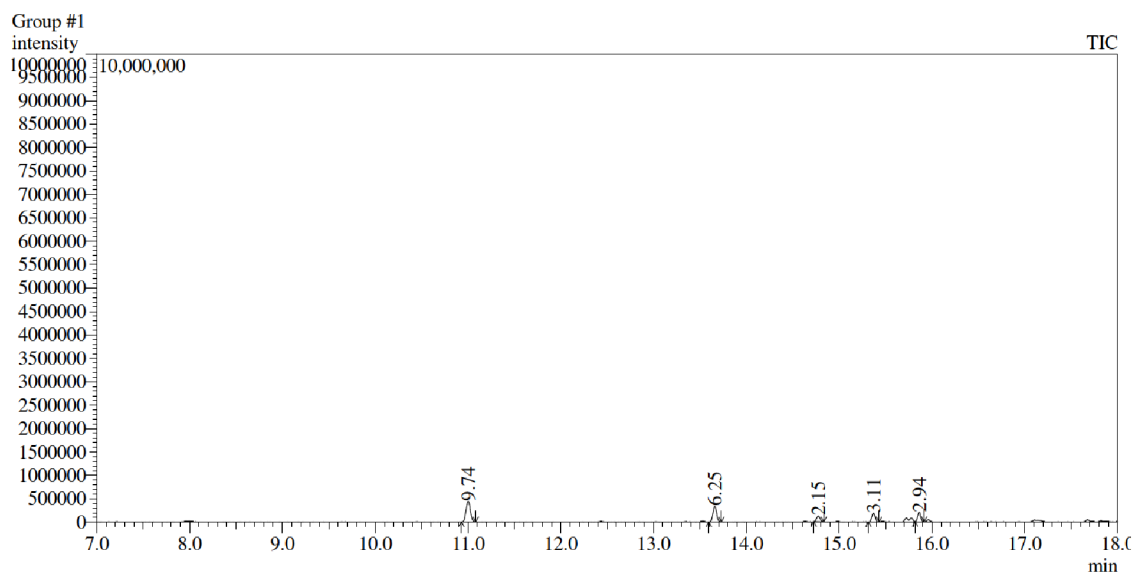
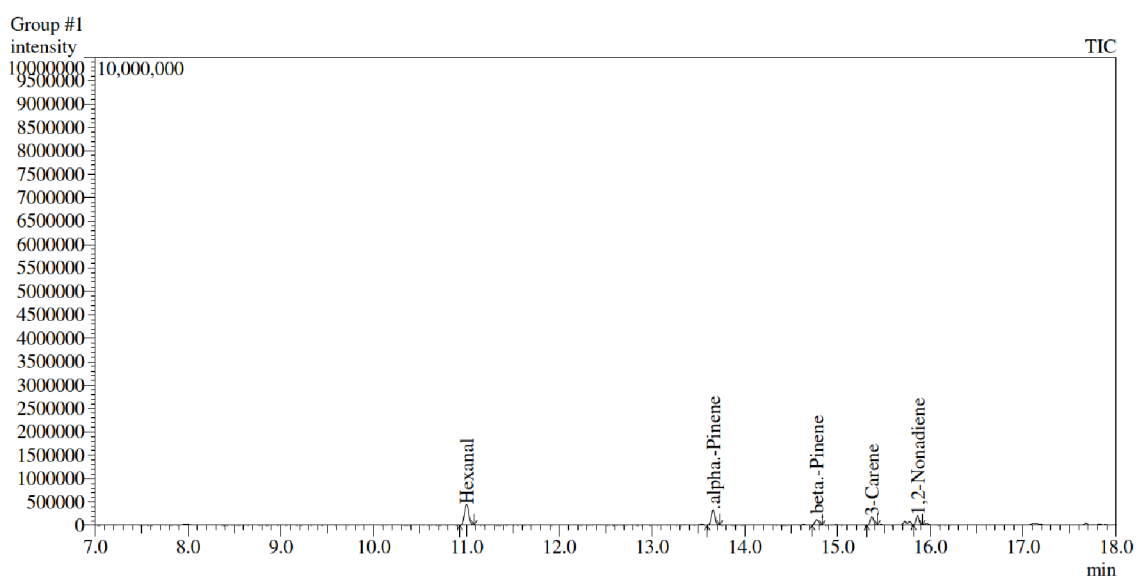
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.031	11159835	63.41	6584012	86.42	1.69	Carbon dioxide
2	10.997	1261685	7.17	391764	5.14	3.22	Hexanal
3	13.655	331334	1.88	120657	1.58	2.75	.alpha.-Pinene
4	15.859	290793	1.65	133592	1.75	2.18	1,2-Nonadiene
5	23.067	4555527	25.88	388889	5.10	11.71	Carbonic acid, 2-ethylhexyl octyl ester
		17599174	100.00	7618914	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 2
28. den
Broušený povrch OSB

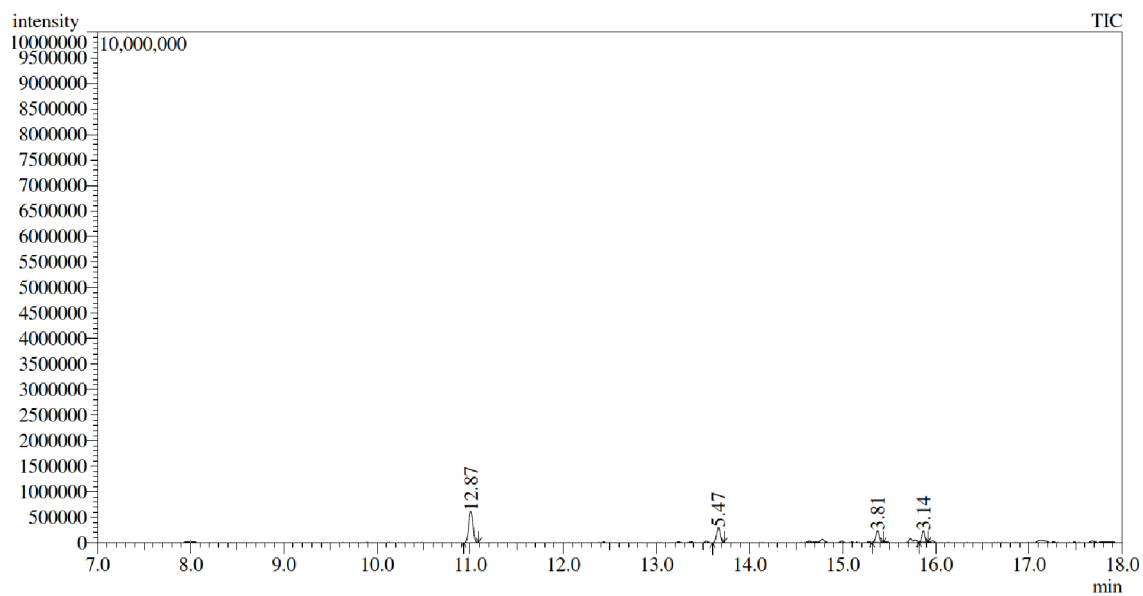
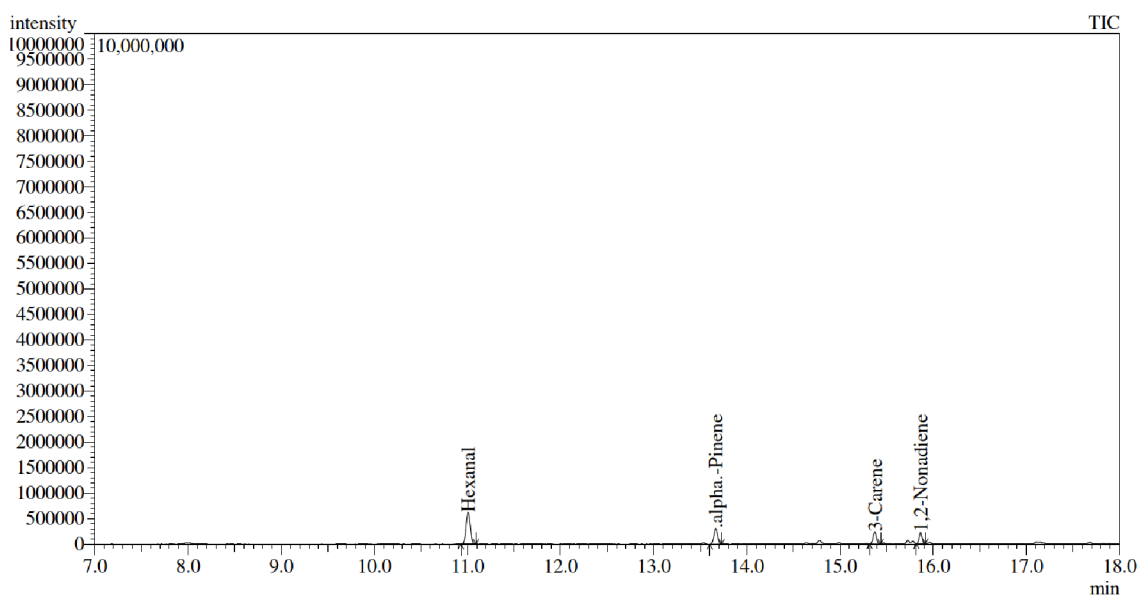
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.031	11176804	75.80	6565315	83.71	1.70	Carbamic acid, monoammonium salt
2	11.002	1436677	9.74	439956	5.61	3.27	Hexanal
3	13.659	921856	6.25	331447	4.23	2.78	.alpha.-Pinene
4	14.774	317062	2.15	119926	1.53	2.64	.beta.-Pinene
5	15.370	459246	3.11	186174	2.37	2.47	3-Carene
6	15.863	433595	2.94	200151	2.55	2.17	1,2-Nonadiene
		14745240	100.00	7842969	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 3
28. den
6% kyselina citronová

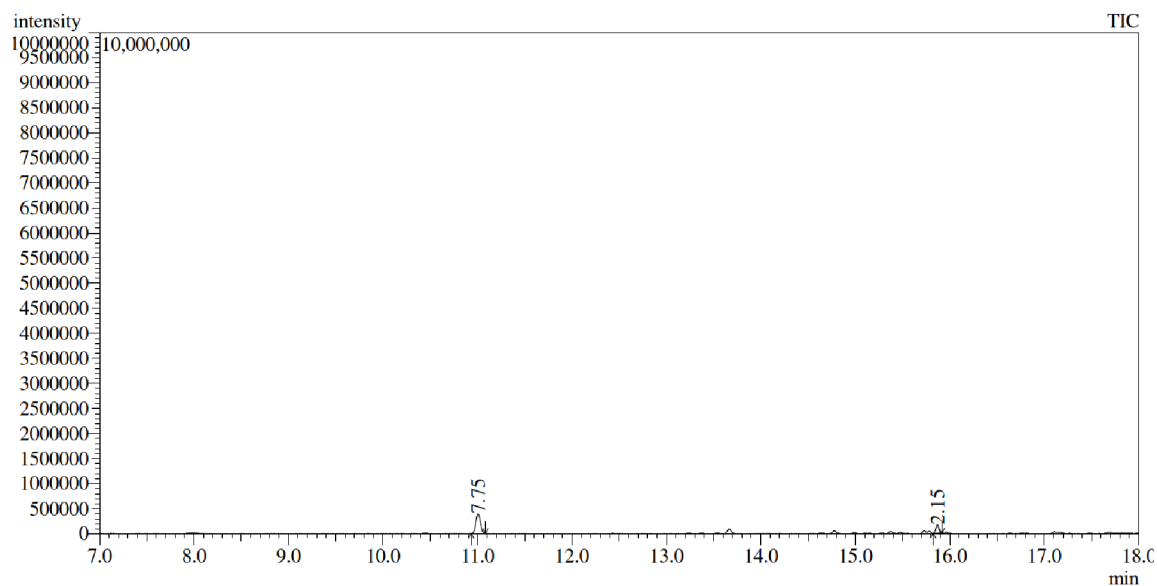
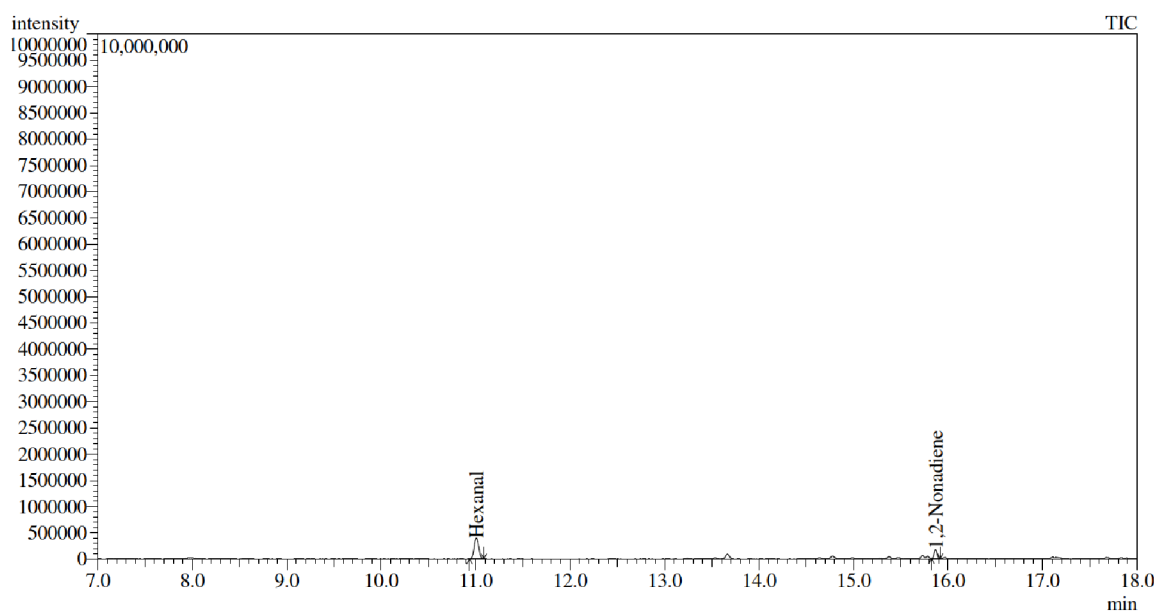
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.031	11418877	74.69	6606915	82.93	1.73	Carbon dioxide
2	11.007	1968013	12.87	609879	7.66	3.23	Hexanal
3	13.665	836913	5.47	299972	3.77	2.79	.alpha.-Pinene
4	15.374	583043	3.81	229671	2.88	2.54	3-Carene
5	15.866	480506	3.14	220113	2.76	2.18	1,2-Nonadiene
		15287352	100.00	7966550	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

Exsikátor 4
28. den
6% kyselina vinná

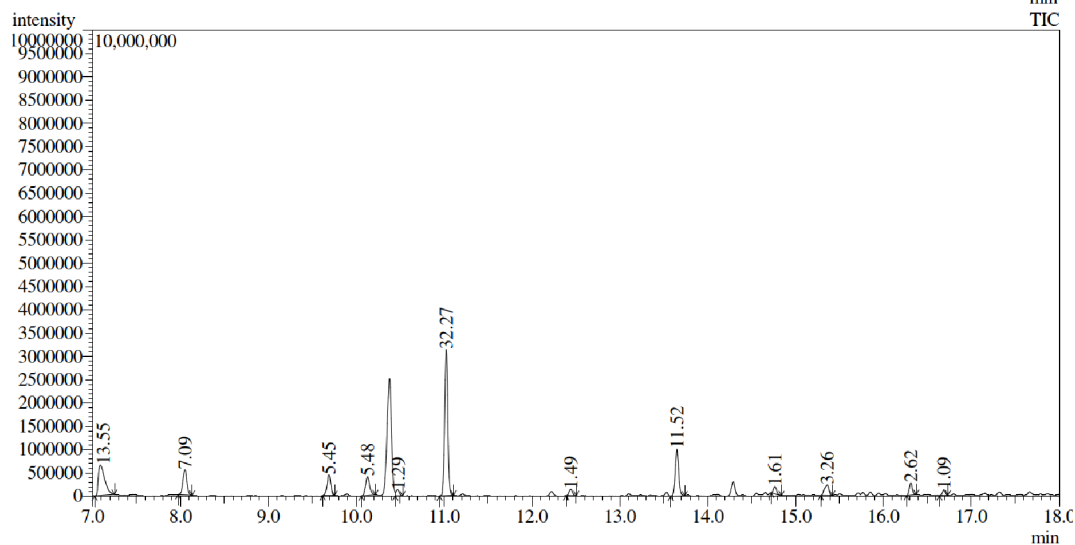
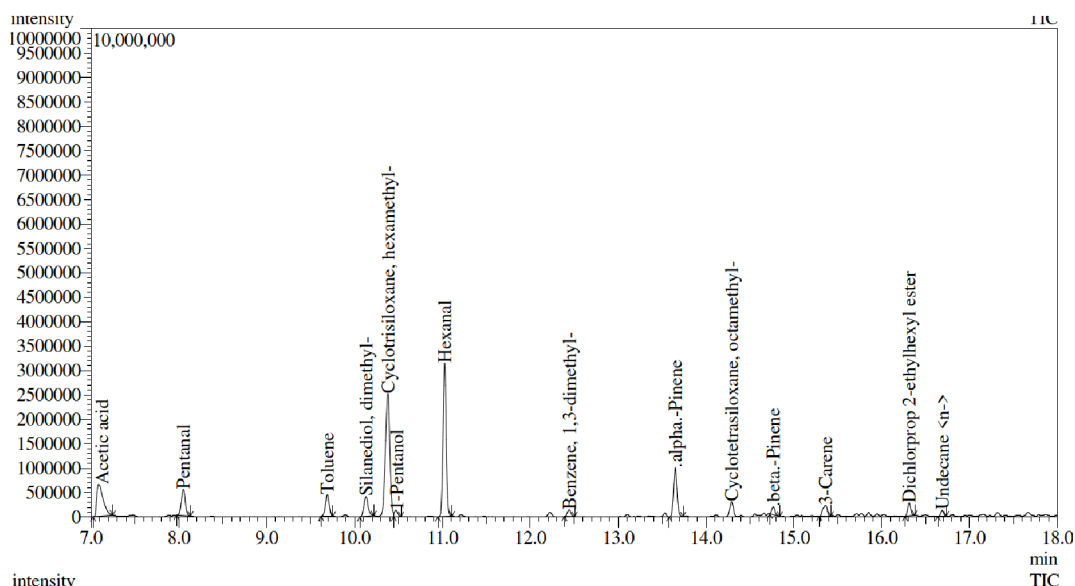
Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	1.031	15074666	90.09	7637891	93.16	1.97	Carbamic acid, monoammonium salt
2	11.007	1297157	7.75	394112	4.81	3.29	Hexanal
3	15.869	360466	2.15	166800	2.03	2.16	1,2-Nonadiene
		16732289	100.00	8198803	100.00		



Příloha č. 2: Výsledné hodnoty stanovení VOCs z OSB pomocí termální desorpce za použití skleněných exsikátorů jako maloobjemových zkušebních komor – pokračování

**Zkušební komora
28. den
6% kyselina citronová**

Peak Report TIC							
Peak#	R.Time	Area	Area%	Height	Height%	A/H	Name
1	2.752	3195619	13.29	460949	6.02	6.93	Acetone
2	7.087	3258408	13.55	650178	8.50	5.01	Acetic acid
3	8.052	1703753	7.09	535550	7.00	3.18	Pentanal
4	9.691	1309195	5.45	443172	5.79	2.95	Toluene
5	10.131	1316429	5.48	405022	5.29	3.25	Silanediol, dimethyl-
6	10.480	309939	1.29	112987	1.48	2.74	1-Pentanol
7	11.026	7759336	32.27	3138020	41.01	2.47	Hexanal
8	12.443	358313	1.49	133899	1.75	2.68	Benzene, 1,3-dimethyl-
9	13.651	2769513	11.52	1004415	13.12	2.76	.alpha.-Pinene
10	14.766	386492	1.61	160692	2.10	2.41	.beta.-Pinene
11	15.361	784614	3.26	224867	2.94	3.49	3-Carene
12	16.312	629266	2.62	264262	3.45	2.38	Dichlorprop 2-ethylhexyl ester
13	16.689	261446	1.09	118713	1.55	2.20	Undecane <n->
		24042323	100.00	7652726	100.00		



Příloha č. 3: Protokol o zkoušce – k měření emise VOCs z OSB ve zkušební komoře – pokračování



PROTOKOL O ZKOUŠCE č. MVZ-N-2018-000182

Příloha:
Str. 2/3

1. PŘEDMĚT A ÚČEL ZKOUŠKY:

Účelem zkoušky je klimatizace dodané OSB ve zkušební komoře a odběr vzorků vzduchu z komory na sorpční trubičky v 5 časových úsecích.

2. ZKUŠEBNÍ VZORKY:

Označení vzorku (laboratoř):	178/18
Název a druh vzorku:	OSB
Popis vzorku:	OSB
Výrobce:	neuvedeno
Množství, rozměr:	1 ks, (300 x 500 x tloušťka) mm
Datum příjmu:	07. 06. 2018
Místo příjmu:	VVÚD - MVZ

3. ZKUŠEBNÍ METODA:

- ČSN EN ISO 16000-9 Vnitřní ovzduší - Část 9: Stanovení emisí těkavých organických látek ze stavebních materiálů a nábytku - Metoda zkušební komory

4. DATUM ZKOUŠKY:

11. 06. 2018 až 09. 07. 2018

5. VÝSLEDEK ZKOUŠKY:

5.1. Zkušební komora - objem 1 m³

materiál zkušebního prostoru - nerezová ocel
systém čištění vzduchu - sorpční filtr
vyčištění zkušební komory tepelnou desorpčí před vložením vzorku

5.2 Příprava zkušebního vzorku:

Vzorek 178/18 byl přepravovaný a uchovávaný zabalený v černé folii. Vybalený byl 11. 06. 2018 v 6:45 min, hrany byly olemované nepropustnou hliníkovou folií a v 7:00 hod byl vložený do zkušební komory.

5.3. Experimentální podmínky a postupy:

Podmínky zkušební komory - teplota (23 ± 1)°C

relativní vlhkost vzduchu (50 ± 3)%

rychlost výměny vzduchu (n) 1h⁻¹

rychlost proudění vzduchu (0,1 - 0,3) m/s

emitující plocha zkušebního vzorku 0,3 m²

faktor zátěže materiálu (L) 0,3 m²/m³

odběr vzorků emitovaných VOC na skleněné sorpční trubičky

použitý adsorbent Tenax TA

odběr vzorků vzduchu odběrovým čerpadlem GilAir PLUS,

rychlost odběru vzduchu 200 ml/min

Příloha č. 3: Protokol o zkoušce – k měření emise VOCs z OSB ve zkušební komoře
– pokračování



PROTOKOL O ZKOUŠCE č. MVZ-N-2018-000182

Příloha:
Str. 3/3

5.4. Identifikace odběrů

Datum odběru	Doba od vložení vzorku do komory (dny)	Označení sorpční trubičky	Objem vzorku (l)	Doba vzorkování (min)
14. 06. 2018	3	1	1	5
14. 06. 2018	3	2	2	10
14. 06. 2018	3	3	3	15
14. 06. 2018	3	4	4	20
14. 06. 2018	3	5	5	25
18. 06. 2018	7	1	1	5
18. 06. 2018	7	2	2	10
18. 06. 2018	7	3	3	15
18. 06. 2018	7	4	4	20
18. 06. 2018	7	5	5	25
25. 06. 2018	14	1	1	5
25. 06. 2018	14	2	2	10
25. 06. 2018	14	3	3	15
25. 06. 2018	14	4	4	20
25. 06. 2018	14	5	5	25
02. 07. 2018	21	1	1	5
02. 07. 2018	21	2	2	10
02. 07. 2018	21	3	3	15
02. 07. 2018	21	4	4	20
02. 07. 2018	21	5	5	25
09. 07. 2018	28	1	1	5
09. 07. 2018	28	2	2	10
09. 07. 2018	28	3	3	15
09. 07. 2018	28	4	4	20
09. 07. 2018	28	5	5	25

Příloha č. 4: Zdrojová data pro vyhodnocení stanovení VOCs v případě smrkových třísek a konopného pazdeří

VOC	VZOREK & DEN ODBĚRU VZORKU																			
	Smrkové třísky				Konopné pazdeří				Konopné pazdeříA				Konopné pazdeříB				Konopné pazdeříC			
	1	3	7	14	1	3	7	14	1	3	7	14	1	3	7	14	1	3	7	14
Kyselina octová	2,05E+07	1,27E+07	1,24E+07	1,16E+07	2,28E+07	9,02E+07	2,08E+06	2,08E+06	9,02E+07	6,15E+07	3,84E+07	3,75E+07	1,77E+08	6,79E+07	4,40E+07	3,45E+07	5,68E+06	6,02E+06	2,45E+06	1,27E+06
Pentanal	4,04E+08	3,40E+08	3,52E+08	4,28E+08	1,00E+08	1,65E+08	1,31E+08	1,98E+08	1,92E+08	1,80E+08	1,49E+08	1,83E+08	2,37E+08	2,14E+08	1,79E+08	1,91E+08	1,27E+09	1,07E+09	6,15E+08	5,54E+08
Toluen	2,74E+08	1,87E+08	1,61E+08	1,36E+08	8,69E+08	5,01E+08	3,68E+08	1,07E+08	4,58E+08	3,77E+08	4,39E+08	2,07E+08	3,85E+08	3,70E+08	4,74E+08	2,12E+08	5,46E+08	2,94E+08	5,68E+08	2,32E+08
Kyselina butanová	1,05E+08	9,84E+07	1,03E+08	1,13E+08					2,02E+07	2,01E+07	2,17E+07	2,63E+07	2,18E+07	2,28E+07	2,48E+07	2,59E+07				
Hexanal	8,06E+08	6,70E+08	6,68E+08	9,25E+08	2,73E+08	3,20E+08	3,72E+08	7,04E+08	6,06E+08	5,82E+08	6,50E+08	7,98E+08	5,77E+08	5,54E+08	6,07E+08	7,87E+08	3,79E+08	3,56E+08	4,08E+08	3,75E+08
Furfural	3,15E+08	5,21E+08	3,42E+08	3,94E+08	1,22E+07	1,92E+07	1,24E+07	1,55E+07	1,06E+10	9,19E+09	5,61E+09	6,67E+09	8,43E+09	5,64E+09	2,56E+09	2,42E+09	9,16E+07	8,55E+07	5,87E+07	6,05E+07
Xylen	3,99E+07	2,35E+07	2,51E+07	3,09E+07	1,43E+08	1,07E+08	9,58E+07	1,56E+08	9,38E+07	1,29E+08	1,09E+08	6,02E+07	1,07E+08	1,31E+08	1,13E+08	6,02E+07	1,18E+08	1,21E+08	1,27E+08	6,05E+07
α-Pinene	1,38E+09	7,35E+09	2,82E+09	4,87E+09	6,66E+08	2,84E+08	2,44E+08	2,36E+07	6,97E+08	7,29E+08	5,94E+08	2,79E+08	6,79E+08	5,72E+08	6,39E+08	2,53E+08	8,87E+08	7,82E+08	8,83E+08	3,03E+08
Kamfen	1,21E+08	1,46E+08	6,37E+07	1,13E+08	1,90E+08	8,25E+07	6,78E+07	2,50E+06	2,24E+08	2,33E+08	1,81E+08	8,89E+07	2,47E+08	1,92E+08	2,02E+08	8,16E+07	2,65E+08	2,36E+08	2,59E+08	8,71E+07
Benzaldehyd	8,21E+08	1,36E+09	8,98E+08	1,62E+09	3,79E+08	2,74E+08	2,87E+08	3,81E+08	7,91E+08	6,76E+08	5,60E+08	4,67E+08	6,97E+08	7,04E+08	5,58E+08	5,40E+08	9,52E+08	8,73E+08	6,82E+08	5,79E+08
β-Pinene	7,61E+08	1,07E+09	2,71E+08	2,19E+09	4,41E+08	1,97E+08	1,71E+08		4,09E+08	4,40E+08	3,91E+08	1,96E+08	2,90E+08	2,86E+08	3,85E+08	1,77E+08	6,49E+08	6,12E+08	6,46E+08	2,33E+08
3-Oktanon				3,08E+06		2,39E+06	2,47E+06	1,82E+06				2,15E+06	2,72E+06				3,86E+06	3,48E+06	3,57E+06	2,15E+06
β-Myrcen	1,77E+08	2,13E+08	8,81E+07	1,47E+08	3,81E+08	1,49E+08	1,42E+08	6,49E+06	3,88E+08	3,64E+08	3,12E+08	1,48E+08	3,82E+08	2,93E+08	3,45E+08	1,41E+08	5,25E+08	4,91E+08	5,01E+08	1,64E+08
Oktanal	9,84E+07	1,01E+08	1,01E+08	1,16E+08	3,60E+07	3,12E+07	4,55E+07	6,54E+07	9,18E+07	8,70E+07	8,09E+07	8,97E+07	7,08E+07	7,85E+07	7,95E+07	8,21E+07	4,13E+07	4,55E+07	4,38E+07	5,10E+07

Pozn.: Barvy odpovídají intenzitě odezvy detektoru

Příloha č. 5: Zdrojová data pro vyhodnocení stanovení VOCs v případě izolačních materiálů

Látky přírodního původu	dřevovláknitá deska	dřevní třísky	konopná izolace	konopné pazdeří	Totora stonek	Totora deska	řepková řezanka	kamenná vlna	skelná vata	polystyren extr.	polystyren expand.	PUR pěna	kaučuková izolace
Acetic acid		1,4E+06	9,6E+05	5,6E+06	4,8E+05	1,5E+06	6,3E+06						
Hexanal	7,0E+07	2,3E+08	1,5E+07	4,4E+07	2,5E+08	1,1E+07	1,1E+07	2,2E+06	6,2E+05	5,7E+06	2,4E+06	3,6E+06	
Heptanal	3,0E+07	2,5E+07	5,2E+06		1,5E+07	1,5E+07	2,0E+07	5,7E+05	5,1E+05	1,2E+07			2,2E+06
alpha-Pinene	2,9E+08	8,2E+07	2,0E+06	3,4E+06	7,2E+06	8,4E+06	3,3E+06		2,0E+06	5,5E+06		1,4E+06	1,0E+07
Limonen	1,3E+07	4,9E+06	6,5E+05	1,8E+06	4,6E+06	3,4E+06	1,4E+06	4,3E+05	2,0E+05	5,3E+06	2,7E+06	6,6E+05	8,3E+06
Rezidua syntetické výroby	dřevovláknitá deska	dřevní třísky	konopná izolace	konopné pazdeří	Totora stonek	Totora deska	řepková řezanka	kamenná vlna	skelná vata	polystyren extr.	polystyren expand.	PUR pěna	kaučuková izolace
Toluene	2,0E+08	2,4E+07		7,3E+07		8,1E+07	5,8E+07			8,1E+08	1,3E+08	9,5E+07	
Benzene, 1,3-dimethyl-		1,6E+06			1,8E+06			5,2E+05		7,5E+08	6,6E+08	4,0E+08	
xylene isomer (para)	2,3E+08	5,1E+06	1,7E+07	7,4E+07	1,3E+07	3,0E+07	2,0E+07	3,0E+06	3,4E+06	6,7E+08	1,8E+09	5,4E+08	2,5E+08
xylene isomer (ortho)									2,3E+05	2,0E+08			
Benzaldehyde	2,2E+08	1,4E+08	1,6E+07	5,5E+06	1,6E+07	2,2E+07	9,0E+07	2,9E+06	2,0E+06	1,5E+08	4,3E+08	9,3E+07	5,2E+06
Phenol	3,5E+07	4,0E+06	1,2E+07	9,9E+05	1,4E+07	1,4E+07	6,5E+06	1,8E+06	1,8E+06	2,9E+07	4,3E+07		7,6E+06
m-Methylstyrene	3,9E+06		2,7E+05	1,4E+06	3,8E+05	4,9E+05	3,6E+05		1,1E+05	6,1E+06	8,4E+05		1,6E+07
Dichlorobenzene, o-	1,8E+06							1,5E+05	3,0E+05			3,7E+08	
Acetophenone	2,4E+06	4,3E+06	6,6E+05	6,3E+05	2,9E+06	1,6E+06		2,7E+05	2,6E+05	1,7E+08	5,5E+07	2,8E+06	2,0E+06
Benzothiazole	3,3E+06	1,8E+06	1,5E+06	2,1E+05	6,6E+05	2,4E+06	1,1E+06	3,9E+05	3,1E+05	5,2E+06	1,2E+06	4,5E+05	8,8E+06

Pozn.: Barvy odpovídají intenzitě odezvy detektoru