

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

KATEDRA DŘEVĚNÝCH VÝROBKŮ A KONSTRUKCÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Stanovení obsahu formaldehydu v dřevotřískových
a dřevovláknitých deskách pomocí NIR spektrometrie**

Determination of formaldehyde content in particleboards
and fiberboards using NIR spectroscopy

Autor práce: Tereza Adamová

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.

Praha 2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Tereza Adamová

Dřevařské inženýrství

Název práce

Stanovení obsahu formaldehydu v dřevotřískových a dřevovláknitých deskách pomocí NIR spektrometrie

Název anglicky

Determination of formaldehyde content in particleboards and fiberboards using NIR spectroscopy

Cíle práce

Cílem diplomové práce je stanovení obsahu formaldehydu v dřevotřískových deskách (DTD) a dřevovláknitých deskách se střední hustotou (MDF) pomocí NIR spektrometrie. Předmětem práce bude porovnání naměřených hodnot s hodnotami obsahu formaldehydu zjištěnými extrakčním postupem – perforátorovou metodou dle ČSN EN 120. Součástí diplomové práce bude návrh korekce kalibrace přístroje Perten DA 7250 pro použití při kontrolních zkouškách obsahu formaldehydu v dřevotřískových a dřevovláknitých deskách.

Metodika

Úvodní část diplomové práce zahrnuje detailnější popis tématu a dílčích cílů práce, včetně formulace hypotéz. Následuje podrobný rozbor současného stavu problematiky a je zpracována literární rešerše. Hlavní část práce představuje experimentální měření. Použité metody zahrnují zejména vlastní měření, ale i sběr a analýzu dat. Další část práce tvoří diskuse (výsledky, jejich hodnocení, porovnání s výsledky ostatních autorů, interpretace, doporučení) a závěr, jehož součástí je vyhodnocení přínosu práce.

Doporučený rozsah práce

70-90 stran textu, 10-20 stran příloh

Klíčová slova

formaldehyd, NIR spektrometrie, DTD, MDF

Doporučené zdroje informací

BÖHM, M., BOMBA, J., REISNER, J. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012. ISBN 978-80-213-2251-6.

BURNS, D. A., CIURCZAK, E.W. Handbook of Near-Infrared Analysis. Boca Raton: CRC Press, 2008. ISBN 978-0-8493-7393-0.

ČSN EN 120. Dřevné materiály. Zisťovanie obsahu formaldehydu. Extrakčný postup zvaný "perforátorová metóda". Praha: Český normalizační institut, 1994.

SIESLER, H.W. et al. Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications. Wiley-VCH: Weinheim, 2002. ISBN: 978-3-527-30149-2.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí

Konzultant

Ing. David Roll

Elektronicky schváleno dne 6. 1. 2016

doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2016

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **„Stanovení obsahu formaldehydu v dřevotřískových a dřevovláknitých deskách pomocí NIR spektrometrie“** vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Martina Böhma, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 18. 4. 2016



.....
Tereza Adamová

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Martinu Böhmovi, Ph.D. za vedení mé práce.

Děkuji Ing. Davidu Rollovi za zprostředkování mého měření v DDL, za vstřícnost, trpělivost při konzultacích a pozitivní impulzy, panu Ing. René Bienovi za rady a detaily k přístroji Perten DA7250, pánům Ing. Davidu Jílkovi a Ladislavu Heřmánkovi, technologům linek, za ochotu a fundovanost výkladů a pracovníkům laboratoře DDL v čele s paní Andreou Jirků za pomoc s přípravou vzorků a praktické rady.

Poděkování patří mojí rodině za celoživotní podporu a energii a Kubovi, kamarádovi z dětství.

ABSTRAKT

Nízký obsah formaldehydu (Fd), zdraví škodlivého bezbarvého plynu, je základním předpokladem pro produkci kvalitních a nezávadných materiálů na bázi dřeva vyhovujících evropským a světovým standardům. NIR (near infrared) spektrometrie je progresivní metodou užívanou v mnohých odvětvích zejména pro kvantitativní analýzu pevných, plynných i kapalných vzorků. Její praktické využití v dřevařském sektoru pro analýzu aglomerovaných materiálů hledá v České republice stále své místo.

V rámci této studie bylo provedeno experimentální měření měsíční produkce dřevotřískových (DTD) a dřevovláknitých (MDF) desek z emisní třídy E1 a dle IKEA Specification vyrobených v Dřevozpracujícím družstvu Lukavec. Byl stanoven obsah Fd v těchto deskách NIR spektrometrem Perten DA 7250. Naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami perforátorové metody, provozní metody pro určování obsahu Fd dle ČSN EN 120.

Hodnoty naměřené NIR spektrometrem byly celkově nadhodnocené ve srovnání s hodnotami perforátorové metody, přesto pro skupinu DTD byla pozorována signifikantní závislost mezi oběma použitými metodami a byla navržena korekce nastavení parametrů kalibrace přístroje. U MDF byl pozorován vliv tloušťky desky na naměřený obsah Fd pomocí NIR spektrometrie

Provedené experimentální měření bylo první svého charakteru v České republice. Aplikovatelnost NIR spektrometrie pro kontrolu kvality aglomerovaných materiálů nebyla prokázána. Pro získání objektivnějšího náhledu na problematiku bylo doporučeno realizovat zkoumání více vzorků v delším časovém období se zaměřením na další ovlivňující parametry.

Klíčová slova: formaldehyd, NIR spektrometrie, DTD, MDF

ABSTRACT

According to European and world-wide used standards, a low number of colorless harmful gas Formaldehyde (Fd) contained in wood-based panels is a crucial precondition for high-quality and nontoxic material. NIR (near infrared) spectroscopy is a progressive method used in many industrial sectors. In particular, it has been applied for quantitative analysis of solid, gaseous and liquid samples. NIR spectroscopy for wood-based materials analysis in wood processing sector is still waiting for its practical utilization in the Czech Republic.

Laboratory experiments with a NIR spectrometer Pertin DA 7250 were conducted to estimate the particle board (PB) and fibre board (MDF) formaldehyde (Fd) content. A monthly output of boards from two different emission classes (E1 and IKEA Specification) produced in Dřevozpracující družstvo Lukavec, Wood Processing Company, was examined. The correlation between NIR analysis and the perforator method, a standard method for determining Fd content according to EN 120 was observed.

The values measured by NIR spectrometer were generally overestimated compared with the perforator method, but a significant correlation between the two methods for PB group was observed and a correction of NIR calibration parameters was proposed to be carried out. In case of MDF, there has been a significant influence of board thickness observed.

This type of experimental measurement is the first of its kind performed in the Czech Republic. In view of the fact that there had been no evidence of applicability of NIR spectroscopy for quality control of wood-based materials, it was recommended to investigate a greater amount of samples over a longer period to obtain a more objective view of the issue.

Keywords: Formaldehyde, NIR Spectroscopy, PB, MDF

OBSAH

1. ÚVOD.....	14
2. CÍL PRÁCE.....	15
3. ROZBOR PROBLEMATIKY	16
3.1. Aglomerované materiály.....	16
3.1.1. Dřevotřískové desky – DTD	18
3.1.2. Dřevovláknité desky se střední hustotou – MDF.....	20
3.2. Lepení a lepicí směsi.....	21
3.2.1. Lepidla	21
3.2.2. Tužidla	22
3.2.3. Močovina	23
3.2.4. Hydrofobizační přísady.....	23
3.3. Formaldehyd	23
3.3.1. Účinky formaldehydu na lidské zdraví.....	24
3.3.2. Použití formaldehydu v dřevařském průmyslu	24
3.3.3. Metody pro měření emise a obsahu Fd	25
3.3.4. Limity pro obsah a únik formaldehydu.....	25
3.4. Spektrální analýza	27
3.4.1. Principy metod spektrální analýzy.....	27
3.4.2. Infračervené záření a IR spektroskopie.....	28
3.4.3. NIR spektrometrie.....	33
4. MATERIÁL A METODIKA	38
4.1. Materiál.....	38
4.1.1. Technologie výroby DTD Lukapol v DDL	38
4.1.2. Technologie výroby MDF Luhopol v DDL.....	42
4.1.3. Stanovení počtu zkušebních vzorků.....	44
4.1.4. Rozměry a odběr zkušebních těles.....	44
4.2. Metodika	46
4.2.1. Stanovení obsahu uvolnitelného Fd – Extrakční postup zvaný „perforátorová metoda“ dle ČSN EN 120	46
4.2.2. Stanovení obsahu uvolnitelného Fd pomocí NIR spektrometrie	49

4.2.3. Zpracování naměřených dat	50
5. VÝSLEDKY A DISKUZE	51
5.1. Základní statistické ukazatele	51
5.1.1. Vlhkost.....	52
5.1.2. Obsah formaldehydu	53
5.2. Korelace a regrese.....	56
5.2.1. Analýza vybraných závislostí kompletního souboru dat	56
5.2.2. Analýza vybraných závislostí dle typů desek a dle emisních tříd	59
6. ZÁVĚR.....	67
SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	69
SEZNAM PŘÍLOH	74
PŘÍLOHY	75

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Aglomerované materiály (NIS, 2013).....	16
Tabulka č. 2: Spektrální oblasti infračerveného záření – IR a rozdělení metod (Koplík, 2015).....	28
Tabulka č. 3: Absorbční charakteristiky aldehydů (Siesler et al., 2002).....	37
Tabulka č. 4: Emisní limity obsahu formaldehydu v deskových materiálech na bázi dřeva (IKEA, 2009; VVÚD, 2016).....	38
Tabulka č. 5: Pokyny pro odběr vzorků DTD a MDF v DDL	45
Tabulka č. 6: Limitní interval pro vlhkost desek (DDL, 2016).....	49
Tabulka č. 7: Základní statistické ukazatele analyzovaného souboru.....	51
Tabulka č. 8: Základní statistické ukazatele pozorovaných DTD a MDF	51
Tabulka č. 9: Základní statistické ukazatele pro emisní třídu E1 a IKEA Sp.	52
Tabulka č. 10: Vlhkost DTD E1	52
Tabulka č. 11: Vlhkost DTD IKEA Specification	52
Tabulka č. 12: Vlhkost MDF E1	53
Tabulka č. 13: Vlhkost MDF IKEA Specification	53
Tabulka č. 14: Obsah Fd v DTD E1	53
Tabulka č. 15: Obsah Fd v DTD IKEA Specification.....	54
Tabulka č. 16: Obsah Fd v MDF E1	54
Tabulka č. 17: Obsah Fd v MDF IKEA Specification	54
Tabulka č. 18: Závislost mezi hodnotami obsahu Fd naměřenými perforátorovou metodou a pomocí NIR spektrometrie	61
Tabulka č. 19: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR.....	62
Tabulka č. 20: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR pro typ desky DTD E1	63
Tabulka č. 21: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR pro typ desky DTD IKEA Sp.	63
Tabulka č. 22: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR pro typ desky MDF E1	63
Tabulka č. 23: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR pro typ desky MDF IKEA Sp.....	64
Tabulka č. 24: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou, obsahem Fd naměřeným pomocí NIR a obsahem Fd naměřeným DDL pro typ desky MDF	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1: Dřevotřískové desky Lukapol (DDL, 2005a)	18
Obrázek č. 2: Dřevovláknité desky MDF Luhopol (DDL, 2005b)	20
Obrázek č. 3: Elektromagnetické spektrum (Adamová dle Wimmer, 2015)	27
Obrázek č. 4: Model harmonického oscilátoru (Adamová dle Holčapek, 2016).....	29
Obrázek č. 5: Znáznornění energetických hladin a vibračních přechodů oscilátoru harmonického (Němec, 2013).....	30
Obrázek č. 6: Znáznornění energetických hladin a vibračních přechodů oscilátoru anharmonického (Němec, 2013).....	31
Obrázek č. 7: Princip difúzně reflektanční techniky (Perten, 2016)	34
Obrázek č. 8: Absorpční pásy vyšších harmonických přechodů (overtónů) a absorpční pásy kombinační (Matějka, 2016)	36
Obrázek č. 9: Skládka pilin a štěpky	39
Obrázek č. 10: Bubnová sušárna třísek	40
Obrázek č. 11: Sedmjetážový lis DTD	41
Obrázek č. 12: Klimatizační sklad	41
Obrázek č. 13: Krácení navrstveného dřevovláknitého koberce kotoučovou pilou..	44
Obrázek č. 14: Vzorky DTD a MDF pro perforátorovou metodu.....	45
Obrázek č. 15: Extrakční přístroj.....	46
Obrázek č. 16: Odměrné baňky 2000 ml s roztokem formaldehydu.....	47
Obrázek č. 17: Sušárna vzorků Memmert	48
Obrázek č. 19: Sestavený zkušební vzorek (Perten, 2014)	49
Obrázek č. 18: Úvodní menu přístroje Perten 7250 (Perten, 2014)	49
Obrázek č. 20: Analýza vzorku NIR zářením (Perten, 2014)	50
Obrázek č. 21: Perforátorová hodnota a vlhkost změřená NIR spektrometrem (Perten, 2014).....	50

SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1: Produkce aglomerovaných materiálů na bázi dřeva v ČR za rok 2014 dle FAOSTAT (2015).....	17
Graf č. 2: Vývoj obsahu formaldehydu v průmyslově vyráběných dřevotřískových deskách – na ose Y je uvedena perforátorová hodnota v mg Fd /100g (Dunky, 2012)	26
Graf č. 3: Porovnání obsahu Fd v DTD a MDF stanoveného perforátorovou metodou a pomocí NIR spektrometrie – diferenciací dle tloušťky desek.....	55
Graf č. 4: Variabilita naměřených hodnot obsahu Fd v DTD a MDF	55
Graf č. 5: Vztah mezi vlhkostí (dle ČSN EN 322) a obsahem Fd stanovenými DDL	57
Graf č. 6: Závislost mezi vlhkostí desek DDL (dle ČSN EN 322) a vlhkostí změřenou přístrojem Perten DA 7250	58
Graf č. 7: Závislost mezi obsahem Fd stanoveným perforátorovou metodou a pomocí NIR spektrometrie pro všechna pozorování DTD a MDF.....	58
Graf č. 8: Závislost mezi obsahem Fd stanoveným perforátorovou metodou a pomocí NIR spektrometrie emisní třídy E1 a IKEA Specification.....	59
Graf č. 9: Závislost mezi naměřenými hodnotami obsahu Fd perforátorovou metodou a NIR spektrometrem pro skupinu DTD a MDF	60
Graf č. 10: Zobrazení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným metodou NIR spektrometrie dle jednotlivých typů desek a emisních tříd.....	62

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

DDL	Dřevozpracující družstvo Lukavec
DTD	Dřevotřísková deska
DVD	Dřevovláknitá deska
Fd	Formaldehyd
IKEA Sp.	IKEA Specification
MDF	Medium Density Fibreboard (Dřevovláknitá deska se střední hustotou)
MUF	Melamin-močovinoformaldehyd
NIR	Near infrared
OSB	Oriented Strand Board (Desky z orientovaných plochých třísek)
ppm	parts per million
VVÚD	Výzkumný a vývojový ústav dřevařský , Praha
Tl.	Tloušťka

1. ÚVOD

Zdravé vnitřní prostředí, ekologické přírodní materiály z trvale udržitelných zdrojů a eliminace využívání fosilních zásob, to jsou trendy dnešní doby. Dřevo je surovinou s nejvyššími předpoklady pro splnění těchto požadavků stále se rozvíjející a zrychlující společnosti.

Zpracování dřeva má v České republice dlouholetou tradici. Vedle přírodně rostlého dřeva reprezentují aglomerované materiály (dřevotřískové a dřevovláknité desky), charakterizující dřevařské odvětví od počátku 20. století, základní materiál pro výrobu nábytku a vybavení interiérů. Jejich produkce představuje významný mezník v hospodaření s méně kvalitní, do té doby odpadní, dřevní surovinou, je však často spojována s vysokou koncentrací formaldehydu zejména v důsledku využívání syntetických lepidel na bázi formaldehydu. Právě formaldehyd je obávaným a neustále diskutovaným pojmem především v souvislosti s výrobou nábytku.

Tlak na „bezformaldehydovou“ produkci ze strany konečného zákazníka, požadujícího ekologické přístupy především v podobě dýchajícího netoxického bydlení, ale též nařízení mezinárodních organizací, vedou výrobce k důslednější kontrole procesu výroby, k pravidelnému testování a certifikaci produktů.

Cílem výrobních společností je využívat nových dostupných technologií, směřovat k větší zdravotní nezávadnosti výrobků při zachování ekonomické stability.

NIR spektrometrie je již standardně užívaná v potravinářství pro analýzy složení, a tedy kvality, potravin. V dřevařském sektoru je prokazatelně použitelná například pro analýzu dřevního vlákna, pro detekci jednotlivých dřevních složek.

Bude však možné využívat rychlosti a jednoduchosti této metody v dřevařském sektoru pro měření obsahu formaldehydu v deskách na bázi dřeva určených pro výrobky do interiéru s vidinou podpoření myšlenky svěžího zdravého bydlení?

2. CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je stanovit obsah formaldehydu v dřevotřískových deskách (DTD) „Lukapol“ a dřevovláknitých deskách se střední hustotou (MDF) „Luhopol“ pomocí NIR spektrometrie přístrojem Perten DA7250, vyhodnotit závislost mezi naměřenými hodnotami obsahu formaldehydu a hodnotami získanými extrakčním postupem – perforátorovou metodou dle ČSN EN 120 a na základě provedeného experimentu zhodnotit využitelnost NIR spektrometrie při kontrolních zkouškách obsahu formaldehydu ve výrobě DTD a MDF v Dřevozpracujícím družstvu Lukavec.

Dílčím cílem práce je navrhnout společnosti Perten možné řešení pro korekci kalibrace měřicího přístroje.

3. ROZBOR PROBLEMATIKY




3.1. Aglomerované materiály

Výroba aglomerovaných materiálů se datuje do druhé poloviny dvacátého století, kdy v oblasti dřevařské prvovýroby vzrostla tendence k efektivnějšímu zacházení s dřevním materiálem, k využívání tenkého dřeva z lesních výchovných těžeb, ke zpracování částí těžebních zbytků, k upotřebení odřezků a kusového odpadu, které vznikají při zpracování dřeva, a konečně k zužitkování drobných částic z řezání a opracování dřeva.

Produkce aglomerovaných materiálů významně ovlivnila celkové využití dřevní hmoty včetně dříve obtížně využitelných nejdrobnějších částic, tj. pilin a hoblin. Díky aglomerovaným materiálům výrazně stoupl průmyslové využití dřeva a byl téměř odbourán pojem dřevní odpad (Böhm et al., 2012).

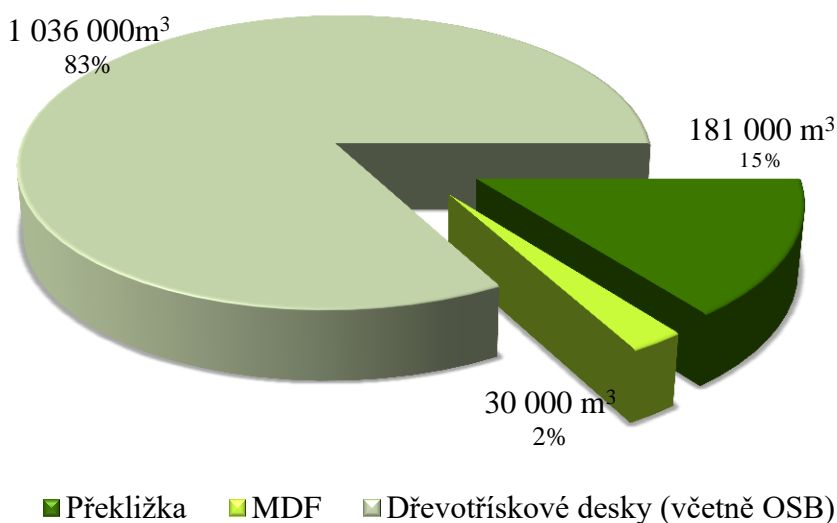
Agglomerované materiály patří do kategorie kompozitních materiálů na bázi dřeva. Jsou to materiály (Tabulka č. 1) klasifikovatelné dle velikosti dřevních částic použitých pro jejich výrobu spojených dohromady syntetickými lepidly za určité teploty a tlaku (Kowaluk, 2011). Technická směrnice (MŽP, 2015) charakterizuje agglomerované materiály jako plošné nebo tvarované materiály vyrobené z částic dřeva nebo jiné lignocelulóзовé hmoty. Eisner et al. (1983) pak specifikují materiály z aglomerovaného dřeva jako výrobky z dřevních částic získaných desagregací neboli dezintegrací kusových sortimentů dřeva a jejich rekonstitucí. Dle stupně desagregace je následně možné dělit vzniklé materiály na třískové a vláknité.

Tabulka č. 1: Aglomerované materiály (NIS, 2013)

DTD	OSB	DVD (MDF)
		
Dřevotřískové desky	Desky z orientovaných třísek	Dřevovláknité desky

Materiály na bázi dřeva do značné míry překonávají nevýhody, které má rostlé dřevo jako konstrukční materiál – heterogenitu, anizotropii a rozměrovou nestálost. Dřevo má kladný vliv na zdraví člověk, je teplé na dotyk, je dobrý tlumič zvuku. Třískové a vláknité desky zachovávají tyto pozitivní vlastnosti a rozšiřují je o velkoplošnost, izotropnost, homogenní strukturu bez přírodních „vad“ charakteristických pro rostlé dřevo, jsou snadno opracovatelné a dodávané v širokém sortimentu (hustota, tloušťka, speciální úpravy). Desky mají příznivé mechanické vlastnosti ve vztahu k objemové hmotnosti, nízkou tepelnou vodivost, jsou dobře spojitelné hřebíky a šrouby, jsou vhodné pro různorodé povrchové úpravy a i v neupravené podobě mají dobrý estetický vzhled. Jejich předností jsou relativně nízká cena a nízké nároky na surovinu. Ve většině případů je možné je po skončení životnosti recyklovat nebo využít energeticky (Čížek, 1985).

Desky z aglomerovaného dřeva mají široké využití. Pro jejich aplikaci je nutné vycházet ze specifických vlastností jednotlivých typů. I přes nárůst výstavby dřevostaveb zaostává Česká republika stále za ostatními zeměmi EU ve využívání velkoplošných materiálů pro stavební truhlářství a stavebnictví. DTD a MDF, které jsou určeny především jako polotovary pro nábytkářství, jsou využívány intenzivně. V této oblasti výroby je jejich potenciál přiměřeně naplněn. (Böhm, 2005; Žák, 1988).



Graf č. 1: Produkce aglomerovaných materiálů na bázi dřeva v ČR za rok 2014 dle FAOSTAT (2015)

3.1.1. Dřevotřískové desky – DTD

DTD neboli dřevotřískové desky se začaly ve světě vyrábět koncem 40. let minulého století. Zavedením jejich výroby se zásadním způsobem změnila možnost využívání zbytkového dřeva nejrůznějšího druhu, které bylo dříve nevyužito nebo bylo využíváno jen pro energetické účely (Novotný, 1989).

Dřevotřísková deska (Obrázek č. 1) je deskový materiál z dřevěných částic (dřevěných třísek, hoblin, pilin, lamel apod.) nebo jiných celulózových částic s přídavkem lepidla vyrobený lisováním za tepla (Böhm et al., 2012).

DTD jsou plošně, výtlačně nebo válcovým lisem lisovaným deskovým materiálem (2005) vyráběným ze dřevité hmoty jehličnatých a listnatých dřevin. V rámci produkce DTD jsou zpracovávány méně kvalitní surové kmeny smrku, borovice, topolové krajiny a krajiny v kůře (Adamová, 2014). Dřevní částice jsou spojovány kvalitní močovino-formaldehydovou pryskyřicí. Standardní dřevotřísková deska je vyrobena jako třívrstvá, hrubé třísky jsou umístěny ve střední vrstvě, jemné třísky ve vrstvách povrchových, může být též jednovrstvá (zpravidla desky pro stavební účely). Pro zvýšení odolnosti desek proti nabírání vzdušné vlhkosti je přidána parafinová emulze (Kowaluk, 2011). Povrch desek je přírodní a je možné v něm rozeznat drobnou kresbu a barvu rozemleté dřevěné drti, respektive všesměrně uložených třísek (DDL, 2005a). Nezávadnost desek hodnocená dle úniku volného formaldehydu (stanoveno mezinárodními normami) je pravidelně testována příslušnými zkušebními orgány - v České republice VVÚD, Praha.



Obrázek č. 1: Dřevotřískové desky Lukapol (DDL, 2005a)

Vlastnosti DTD jsou ovlivněny řadou činitelů, mezi které patří zejména velikost třísek, druh použité dřeviny a druh použitého lepidla. Všeobecně mají tyto desky horší mechanické vlastnosti než masivní dřevo, ale také mnohem nižší roztažnost vlivem vlhkosti. (Böhm et al., 2012). Mezi výhody tohoto materiálu patří vysoká pevnost v tahu za ohybu, odolnost proti oděru, poškrábání, nárazu a chemikáliím, dobrá opracovatelnost a rychlá a snadná montáž (DDL, 2005a).

Desky mohou být dodávány surové (nebroušené nebo broušené), používané na neviditelné dílce čalouněného nábytku, dýhované, především na výrobu bytového nábytku, laminované, disponující velmi odolným povrchem, nebo kaširované (papírovou nebo plastovou folií), využitelné zejména na koupelnový, kuchyňský a kancelářský nábytek (Böhm et al., 2012).

Dřevotřískové desky jsou v současné době nejvíce rozšířeným a nejvíce vyráběným aglomerovaným materiálem. Vyrábějí se pro mnoho různých účelů využití především však pro vnitřní vybavení interiérů, výrobu nábytku, obklady a podlahoviny (DDL, 2005a). DTD, které jsou zařazeny jako nosné desky dle ČSN EN 13 986, jsou používány např. jako nosné části prefabrikovaných panelů dřevostaveb (Beránková, 2010).

DTD jsou nejlevnějším druhem aglomerovaných materiálů, podstatně levnějším než překližky nebo laťovky. Cena dřevotřískových desek je závislá na tloušťce a povrchové úpravě (Böhm et al., 2012).

Druhy dřevotřískových desek dle ČSN EN 312 (2004):

- P1 – Desky pro všeobecné účely pro použití v suchém prostředí
- P2 – Desky pro vnitřní vybavení (včetně nábytku) pro použití v suchém prostředí
- P3 – Nenosné desky pro použití ve vlhkém prostředí
- P4 – Nosné desky pro použití v suchém prostředí
- P5 – Nosné desky pro použití ve vlhkém prostředí
- P6 – Zvlášť zatížitelné nosné desky pro použití v suchém prostředí
- P7 – Zvlášť zatížitelné nosné desky pro použití ve vlhkém prostředí

3.1.2. Dřevovláknité desky se střední hustotou – MDF

Rozmach výroby dřevovláknitých desek nastal koncem 20. let po objevení možnosti slisovat rozvlákněné dřevo za tepla a vysokého tlaku v tvrdou kompaktní desku. V této první fázi se uplatňoval tzv. mokrý proces známý z výroby papíru, velmi nákladný na množství spotřebované technologické vody (Nagy, 1989).

MDF (Medium Density Fiberboard), nazývané středně tvrdé vláknité desky (Obrázek č. 2), jsou vláknité desky se střední hustotou (Böhm et al., 2012), vyráběné, jak udává Kowaluk (2011), suchým způsobem z dřevěných vláken (především smrkových) pojených syntetickým lepidlem za použití teploty a tlaku (DDL, 2005b).

V České republice se výrobou MDF zabývá od roku 1992 Dřevozpracující družstvo Lukavec, které uplatňuje suchý způsob výroby, méně náročný na spotřebu technologické vody. Stěžejní pro výrobu desek je kvalitní surovina pro získání vhodného dřevního vlákna. DDL používá pro výrobu MDF dřevo smrku, buku a borovice (Adamová, 2014).



Obrázek č. 2: Dřevovláknité desky MDF Luhopol (DDL, 2005b)

Desky MDF jsou plnohodnotnou náhradou masivního dřeva, především při požadavku na tvarové obrábění. Používají se všude tam, kde nevyhovují běžné typy dřevotřískových desek, které jsou levnější, ale mají nehomogenní strukturu. MDF jsou vyráběny převážně jako jednovrstvé, ale mohou být i vícevrstvé.

Nejdůležitější vlastností MDF je stejnorodá struktura slisovaných vláken v celém průřezu desky - homogenita, která umožňuje čisté kvalitní opracování povrchu. Díky tomu jsou MDF vhodné pro použití zejména v interiéru -

- v nábytkářství, truhlářství, frézařských dílnách, kde jsou opracovány frézováním reliéfů do ploch desek, lakováním, dýhováním, laminováním a vysokotlakým laminátem. Struktura desek umožňuje profilování boků, časté je použití na kuchyňská dvířka a čela zásuvek. V laminovaném nebo dýhovaném provedení mohou být MDF využívány pro výrobu stolních desek (Böhm et al., 2012; DDL, 2005b). Ve stavebnictví se MDF používají pro vnější opláštění stěn dřevostaveb a pro záklopy střech na krokve pod tvrdou krytinu (Beránková, 2010).

Mezi výhody MDF patří především vysoká odolnost proti tepelnému namáhání a snadná údržba. Pozitivně je hodnocena poměrně vysoká hodnota pevnosti v tahu kolmo na plochu desky (rozlupčivosti) (Böhm et al., 2012; DDL, 2005b).

3.2. Lepení a lepicí směsi

Lepení představuje jediný způsob nerozebíratelného nedestrukčního spojení pomocí nekovového materiálu – lepidla. Lepidla jsou materiály schopné spojit tuhá tělesa v důsledku přilnavosti k jejich povrchu a jejich dobré vnitřní soudržnosti - kohezi. Jako lepení neboli adheze se označuje síla, která spojí dva předměty na rozhraní jejich povrchu. Při lepení probíhají chemické a fyzikální procesy určené fyzikálně chemickými vlastnostmi lepidel. V dnešní době jsou ve dřevařském průmyslu vedle lepidel rostlinného a živočišného původu významně zastoupena lepidla syntetická (Böhm, 2005; Muzikář et al., 2008).

Lepidlo je nejčastěji nanášeno v lepicí směsi s ostatními přídatnými látkami, jako jsou tužidla (tvrdidla) a hydrofobizační přísady (Böhm, 2008).

3.2.1. Lepidla

Muzikář et al. (2008) charakterizuje lepidla jako polymerní nekovové materiály s velkou soudržností. Jsou to chemicky a technologicky složité směsi, jejichž počátek průmyslové výroby se datuje od 17. století. Výroba syntetických lepidel, která dala vznik výrobě aglomerovaných materiálů, se rozvinula před druhou světovou válkou společně s rozvojem průmyslu plastických hmot. Do této doby se k lepení používala lepidla přírodní – rostlinná (škrobová, lepidla z rostlinných bílkovin, pektiny, rostlinné gummy a pryskyřice, lepidla z přírodního kaučuku a na bázi celulózy) a živočišná (glutinová, kaseinová a albuminová).

Znalost vlastností lepidel dává předpoklad k jejich správnému technicko-technologickému použití. Ve výrobě aglomerovaných materiálů se zejména uplatňují syntetická lepidla termoreaktivní – močovinoformaldehydová (UF), melaminformaldehydová (MF) a fenolformaldehydová (PF) (Žák, 1988).

V produkci aglomerovaných materiálů se používají především syntetická dvousložková lepidla – termoreaktivní, u nichž se film lepidla tvoří chemickou reakcí s tvrdidlem (tužidlem) za zvýšené teploty a tlaku (Muzikář et al., 2008). Díky nízké ceně jsou nejrozšířenější lepidla močovinoformaldehydová – především u výrobků pro využití v interiéru (Böhm, 2008).

Mezi jejich nevýhody však patří uvolňování Fd jak při výrobě desek, tak při jejich skladování a používání, nižší odolnost proti vodě a povětrnostním vlivům.

Reaktivita močovinoformaldehydového lepidla spočívá ve způsobu jeho přípravy, zejména v molárním poměru močoviny a formaldehydu. Se vzrůstajícím podílem formaldehydu vzrůstá nejen reaktivita, ale i procento volného formaldehydu. Udává se molární poměr 1:1,18 až 1:1,92. Molární poměr má vliv na viskozitu a rozpustnost lepidla ve vodě. Dalším faktorem ovlivňujícím průběh kondenzace močoviny a Fd je pH. Močovinoformaldehydová lepidla mají v době dodávky pH 7 až 8, což znamená, že v tomto stavu nemohou být zpracována. Přidávají se proto tužidla, která působí jako katalyzátory vytvrzovací reakce. Nejmenší rychlost reakce je při pH 5-7. V kyselém prostředí pak probíhá především kondenzace za vzniku pryskyřičných produktů, v alkalickém prostředí vznikají adiční metylové sloučeniny (Böhm, 2005; David, Kratochvíl, 1986).

Ve výrobních provozech je prováděna příjmová zkouška lepidel.

3.2.2. Tužidla

Tužidlo neboli tvrdidlo sníží hodnotu pH lepidla až na hodnotu 3 – 3,5, takže za normální nebo zvýšené teploty dojde k vytvrzení lepidla. Nejčastěji používaným tvrdidlem NH_4NO_3 .

Vytvrzené lepidlo je pak zdravotně nezávadné, nedostatkem však zůstává volný formaldehyd (David, Kratochvíl, 1986).

3.2.3. Močovina

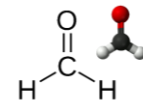
Močovina ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) se průmyslově vyrábí ze zemního plynu a vzduchu. Tato směs je stlačena při vysoké teplotě (210°C) a proběhne několik chemických reakcí, které vyprodukují směs amoniaku, uhličitanu amonného a močoviny. Směs produktů se dehydratuje, aby vznikla močovina ve formě krystalů nebo prášku (GreenChem, 2016). Močovina je přidávána do lepicích směsí formou 40% vodného roztoku s cílem snížit množství volného formaldehydu.

3.2.4. Hydrofobizační přísady

Pro snížení bobtnání a zvýšení odolnosti desek vůči vodě a vodní páře jsou do lepicí směsi přidávány hydrofobizační přísady. Pro DTD i MDF se využívá způsob nanášení parafínu formou emulze, kdy je parafínová emulze o koncentraci 60 – 68 % i s dalšími přísadami ve směsi s lepidlem. Do MDF je přidáván navíc samotný parafín. Parafín značně snižuje bobtnání aglomerovaných materiálů. Hydrofobizace je účinná zejména při krátkodobém působení kapalně vody (Böhm, 2008).

3.3. Formaldehyd

Formaldehyd (Fd), systematickým chemickým názvem metanal (CH_2O), je nejjednodušší aldehyd. Při pokojové teplotě je Fd bezbarvý plyn s palčivým, dráždivým zápachem. Komerčně je vyráběn z metanolu. Rozkládá se při teplotě nad 150°C , je vysoce reaktivní a může vytvářet výbušné směsi. Rozpouští se ve vodě, alkoholu a dalších polárních rozpouštědlech.



Fd se přirozeně vyskytuje v přírodě. Je produktem mnoha přírodních procesů. Je uvolňován během spalování biomasy, například při lesních požárech. Ve vodě vzniká při osvětlení humusu¹ slunečním světlem.

Mezi zdroje formaldehydu antropogenního charakteru patří především spalování paliv, různé formy průmyslového využití (na úrovni produkce, užívání, uskladnění a přepravy materiálu) a uvolňování ze stavebních materiálů a spotřebních produktů (materiály na bázi dřeva, textilní produkty, koberce, latexové barvy a pryskyřice) (Liteplo et al., 2002).

¹ **Humus** je soubor organických látek původem z odumřelých zbytků rostlin, živočichů a mikrobů (Vrba, Huleš, 2006)

3.3.1. Účinky formaldehydu na lidské zdraví

Formaldehyd je posuzován jako nebezpečná látka (Buyuksari et al., 2010). Samotný Fd a pryskyřice obsahující Fd jsou považovány za původce alergických reakcí. Negativní účinky na lidské zdraví jsou zaznamenány při delším vystavení se působení Fd a při jeho vyšší koncentraci. Expozice malým dávkám může vyvolat bolesti hlavy a podráždění sliznic (Böhm et al., 2012). Od roku 2012 je Fd zařazen dle hodnocení IARC (2016) do 1. skupiny karcinogenních látek (*Group 1 – Carcinogenic to humans*) mezi 118 potenciálně nejnebezpečnějších rakovinotvorných látek. Většina epidemiologických studií prokazuje spojitost vzniku rakoviny dýchacího ústrojí se zvýšenou expozicí formaldehydu. Vedle problémů s respirací a podrážděním sliznic jsou zaznamenány případy vzniku leukemie, rakoviny slinivky a plic, nádorů mozku a očních nádorů (Liteplo et al., 2002).

3.3.2. Použití formaldehydu v dřevařském průmyslu

V oblasti dřevařského průmyslu je Fd důležitou chemickou surovinou pro výrobu termosetických lepidel/pryskyřic. Reakcí Fd s jinými monomery, většinou močovinou, ale také melaminem, fenolem nebo resorcinolem, vznikají lepidla na bázi formaldehydu, která se používají především při výrobě materiálů na bázi dřeva, jakými jsou: překližka, dřevotříska (DTD), sololit, polotvrdá dřevovláknitá deska (MDF) a deska z orientovaných plochých třísek (OSB) (Carvalho et al., 2012).

Močovino-formaldehydová, UF (urea-formaldehyde) lepidla jsou nejvýznamnějšími adhezivy používanými v dřevařském průmyslu. Tato lepidla rychle vytvrzují a vytváří bezbarvý spoj, mají však omezenou schopnost odolávat vlhkosti (Salem et al., 2011). Chemická stabilita UF pryskyřic, obsah formaldehydu, vlhkost a teplota jsou pak prokazatelnými faktory ovlivňujícími množství uvolněného formaldehydu z materiálů, které jsou vyrobeny s právě s použitím UF lepidel (Frihart et al., 2012). Faktorem ovlivňujícím obsah formaldehydu v aglomerovaných materiálech je i samotné dřevo použité pro jejich výrobu. Dřevo, jakožto produkt metabolismu a dekompozičního procesu, přispívá samo o sobě k variabilitě obsahu formaldehydu v materiálech na bázi dřeva. Množství uvolněného formaldehydu pak tedy mimo jiné značně závisí na použitém druhu dřeva (Carvalho et al., 2012).

3.3.3. Metody pro měření emise a obsahu Fd

Průmysl intenzivně vyvíjí strategie pro minimalizaci emisí formaldehydu z aglomerovaných materiálů.

Implementace mezinárodních pravidel a požadavků na emise z materiálů na bázi dřeva vedla k vytvoření referenčních testovacích metod. Referenční metody jsou postupy zkoušení, měření či analýzy, které jsou podrobně popsány a ověřeny a jsou určeny pro hodnocení kvality jiných postupů pro srovnatelné úkoly, pro charakterizování referenčních materiálů včetně referenčních objektů a pro stanovení referenčních hodnot. Pro měření emise Fd byla ustanovena komorová metoda imitující vnitřní prostředí vyjadřující emisi Fd v mg/m^3 (dle ČSN EN 717-1).

Referenční metody lze používat k validaci jiných měřících nebo zkušebních postupů, které jsou použity pro stejný záměr. Od komorové, referenční, metody byly odvozeny tzv. provozní testy orientované na průmyslovou kontrolu kvality a vývoje. Tato druhá skupina zahrnuje běžně užívané standardní metody: perforátorová metoda (dle ČSN EN 120) stanovující obsah Fd, lahvová metoda nebo plynová analýza pro stanovení emise Fd (Carvalho et al., 2012; SČS, 2015).

3.3.4. Limity pro obsah a únik formaldehydu

Obsah formaldehydu je důležitým faktorem při hodnocení environmentální a zdravotní nezávadnosti materiálů na bázi dřeva (Risholm-Sundman et al., 2007). Vzhledem k prokázanému negativnímu působení Fd na lidské zdraví, jeho reaktivitě, toxicitě a štiplavému zápachu docházelo v průběhu desetiletí k redukování jeho obsahu v materiálech na bázi dřeva (Graf č. 2). Koncentrace Fd ve vnitřních prostředích je dnes kvůli jeho škodlivosti omezena v mnoha zemích (Buyuksari et al., 2010)

V ČR je jediná schválená zkušebna, která může vydávat certifikát CARB a posouzení shody IKEA Sp. VVÚD Praha.

Evropské harmonizované normy rozdělují deskový materiál dle obsahu formaldehydu na dvě kategorie E1 a E2. Desky z kategorie E1 mohou být použity v interiéru, desky z kategorie E2 pouze v exteriéru.

Požadavky v Evropě:

E1 – $\leq 8 \text{ mg Fd} / 100 \text{ g desky}$

E2 – $\geq 8 \text{ a více mg Fd} / 100 \text{ g desky}$ (VVÚD, 2016)

Dle amerických norem z hlediska obsahu formaldehydu dle CARB (California Air Resources Board) jsou DTD a MDF testovány metodou ASTM E 1333, tzv. Velká komora nebo ASTM D 6007, tzv. Malá komora a hodnoty emise formaldehydu jsou vyjádřeny pomocí ppm nebo také v mg/L (mg/m^3). Certifikáty k provedenému testování ve VVÚD v Praze prokazující splnění nařízeních této normy DTD a MDF vyrobenými v DDL viz Příloha č. 4 a Příloha č. 5.

Americká norma: CARB

DTD – 0,09 ppm

MDF – 0,11 ppm

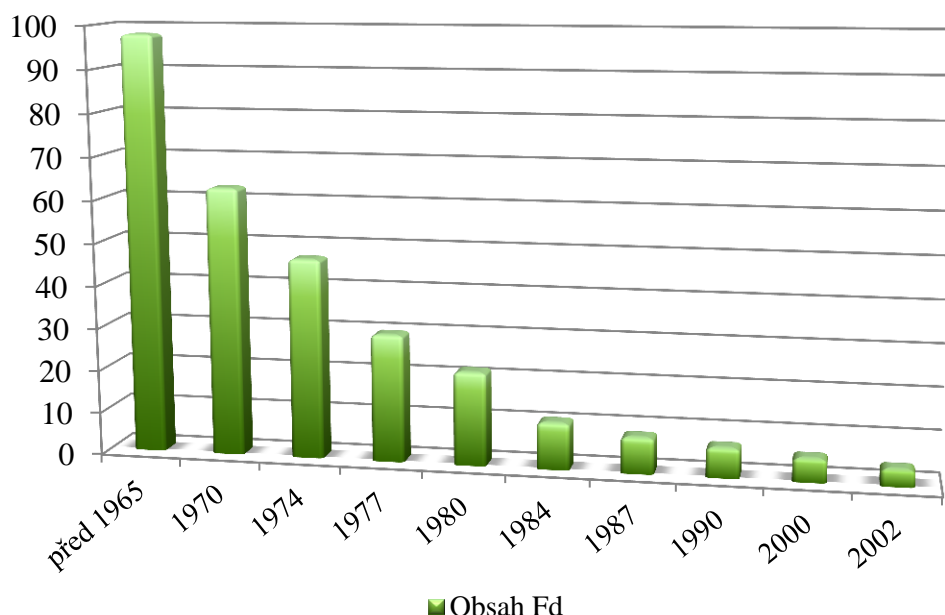
Zvláštním nařízením je dokument IKEA Specification - Formaldehyde requirements of wood-based materials and products, který charakterizuje požadavky na dřevotřískové a dřevovláknité desky dodávané pro společnost IKEA.

Obsah formaldehydu v deskách je stanoven pro testování Perforátorovou metodou dle ČSN EN 120.

IKEA Specification:

DTD – 4 mg/100g

MDF – 5 mg/100g (IKEA, 2009)



Graf č. 2: Vývoj obsahu formaldehydu v průmyslově vyráběných dřevotřískových deskách – na ose Y je uvedena perforátorová hodnota v mg Fd/100g (Dunky, 2012)

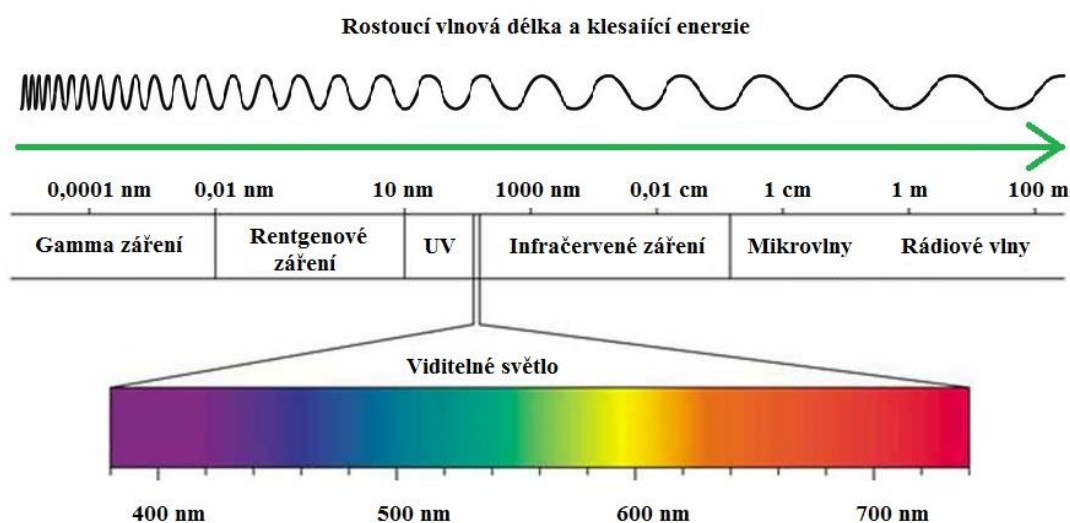
3.4. Spektrální analýza

3.4.1. Principy metod spektrální analýzy

Viditelné světlo, stejně jako řada dalších lidským okem nevnímaných záření, patří mezi elektromagnetická záření. Metody spektrální analýzy jsou založeny na interakci látek/hmoty a energie elektromagnetického záření. Záření může být např. absorbováno, rozptýleno, odraženo, emitováno nebo zlomeno. Z množství absorbovaného nebo emitovaného viditelného i neviditelného záření různých vlnových délek lze získat údaje o jednotlivých energetických hladinách a z těchto dat lze následně vyvodit podrobné informace o struktuře molekul nebo krystalů, jimž studovaná spektra přísluší.

Charakteristikou určitého záření je jeho vlnová délka – λ nebo vlnčet - $\tilde{\nu}$ (počet vln připadající na jeden metr, ale v praxi nejčastěji se používají jednotky Kayser = cm^{-1} udávající počet vln na 1 cm) (Matějka, 2010; Novotná et al., 2016).

Elektromagnetické záření zároveň představuje proud energetických kvant. Čím kratší je vlnová délka (čím větší je vlnčet), tím větší je energie kvanta. Energetické stavy atomů, iontů a molekul jsou kvantovány. To znamená, že tyto částice mohou přijmout jen určitá (nikoli libovolná) kvanta energie a dostat se tak do energeticky bohatších (excitovaných) stavů. Podobně při přechodu částice do energeticky nižšího stavu může dojít k uvolnění pouze celistvého kvanta energie.



Obrázek č. 3: Elektromagnetické spektrum (Adamová dle Wimmer, 2015)

Jedná-li se o jednoduchý přechod mezi dvěma energetickými hladinami, potom energie a také vlnová délka absorbovaného i emitovaného záření jsou stejné.

Obrázek č. 3 zobrazuje elektromagnetické spektrum. Energeticky velmi bohaté rentgenové záření (vlnová délka 0,01 až 10 nm) vyráží elektrony z vnitřních (nikoli vazebných) orbitalů v atomu. Ultrafialové (UV, 200 až 400 nm) a viditelné záření (VIS, 400 až 780 nm) má energii dostačující právě pro excitaci elektronů ve vnějších (vazebných) orbitalech atomů anebo pro excitaci vazebných elektronů v molekulách. Energie infračerveného záření (IR, Infra Red) s ještě větší vlnovou délkou (780 až 2500 nm), (vlnočty 200 až 3 700 cm^{-1}) odpovídá změnám v energii vibračních a rotačních stavů molekul. Radiové vlny používané v NMR mají vlnočty okolo 0,001 cm^{-1} , vlnové délky okolo 10 m (ještě menší energie) (Bartůšek, Pazourek, 2013).

3.4.2. Infračervené záření a IR spektroskopie

Infračervené záření navazuje na jedné straně spektra na záření viditelné a na straně druhé na záření mikrovlnné.

3.4.2.1. Dělení IR spektroskopie

Podle vžitě konvence je IR spektroskopie dělena podle vlnových délek záření na tři skupiny - spektroskopii v blízké infračervené oblasti (NIR z angl. near infrared), střední infračervené oblasti (MIR z angl. middle infrared) a vzdálené infračervené oblasti (FIR z angl. far infrared), (Kania, 2016).

Tabulka č. 2: Spektrální oblasti infračerveného záření – IR a rozdělení metod (Koplík, 2015)

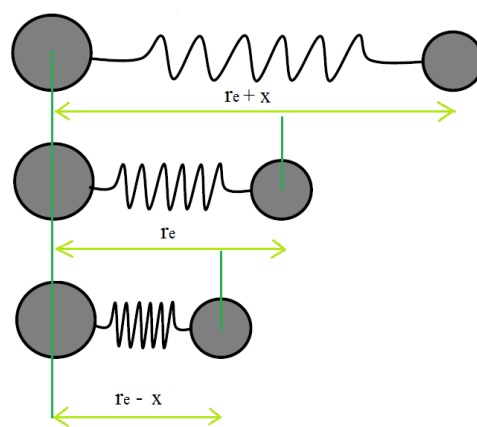
Spektrální oblasti IR a rozdělení metod			
	λ (μm)	$\tilde{\nu}$ (cm^{-1})	vibrace
Blízká infračervená oblast (near infrared, NIR)	0,8 – 2,5	12 500 – 4 000	vyšší harmonické vibrační přechody (overtones)
Střední infračervená oblast (mid infrared, MIR)	2,5 – 50	4 000 – 400	normální vibrační přechody
Vzdálená infračervená oblast (far infrared, FIR)	50 – 1000	400 – 10	mřížové frekvence a normální vibrace slabých vazeb a vazeb těžkých atomů

3.4.2.2. Principy IR spektroskopie

Podstatou infračervené spektroskopie je interakce infračerveného záření se studovanou látkou. Při měření studovaných látek jde v podstatě o určování frekvencí (vlnočtů), při kterých může látka záření - foton² o určité energii pohltit (absorpční infračervená spektroskopie), nebo vyzářit (emisní infračervená spektroskopie) viz kapitola 3.4.2.3. Přestože je infračervená spektroskopie využívána při analýze makroskopických vzorků, její podstatou je interakce mikročástic (molekul), tvořících tento makroskopický vzorek, s infračerveným zářením (Kania, 2016).

Molekuly jsou tvořeny atomy, které nejsou spojeny stabilními vazbami. Tyto vazby vykazují určitou pružnost, tvoří systém atomů. Molekula je schopna absorbovat elektromagnetické záření tím, že mění stav svého elektronového obalu vibračními pohyby atomů a svojí rotací jako celku. Každý atom nebo molekula tedy vibrují kolem své rovnovážné pozice. Frekvence těchto vibrací závisí na hmotě a vzájemném uspořádání zúčastněných částic - molekulové geometrii, síle jejich chemických vazeb (Kania, 2016; Novotná et al., 2016).

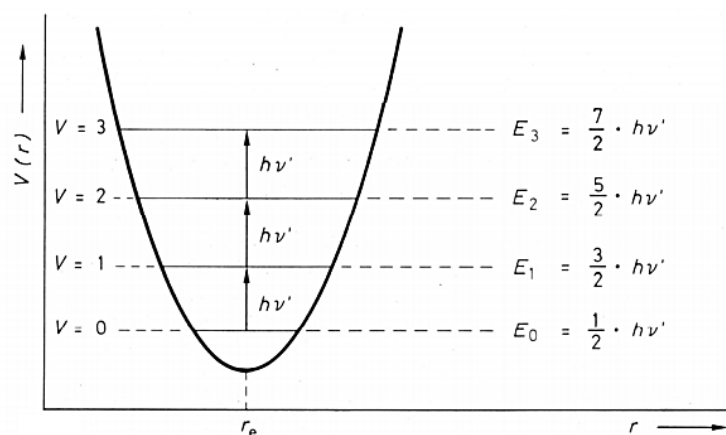
Vibrační pohyb si lze představit jako periodickou změnu mezijaderné vzdálenosti (r_e) mezi atomy. Vibrace a rotace molekul se řídí zákony kvantové mechaniky. Principiálně lze vibrační pohyb v nejjednodušším případě dvouatomové molekuly popsat modelem lineárního/harmonického oscilátoru³ (Obrázek č. 4). (Míka et al., 2008; Novotná et al., 2016; Siesler et al., 2002).



Obrázek č. 4: Model harmonického oscilátoru (Adamová dle Holčapek, 2016)

² **Foton** je částice s nulovou klidovou rychlostí (Matějka, 2010)

³ **Harmonický oscilátor** lze obecně definovat jako fyzikální systém, u něž se fyzikální veličina charakterizující fyzikální vlastnost daného systému mění v čase tak, že tyto změny jsou harmonickou funkcí (sinus, kosinus). Základním příkladem harmonického oscilátoru je těleso, které harmonicky kmitá kolem své rovnovážné polohy. Příkladem harmonického oscilátoru může být těleso zavěšené na pružině nebo atom v molekule. Harmonický pohyb je pohybem periodickým (Hofman, Urbanová, 2011).



Obrázek č. 5: Znázornění energetických hladin a vibračních přechodů oscilátoru harmonického (Němec, 2013)

$$E = h \cdot \nu \cdot \left(v + \frac{1}{2} \right)$$

$$v = 0, 1, 2, \dots$$

$$\Delta v = \pm 1$$

E je energie harmonického oscilátoru

h je Planckova konstanta

ν je frekvence pohybu

v je vibrační kvantové číslo

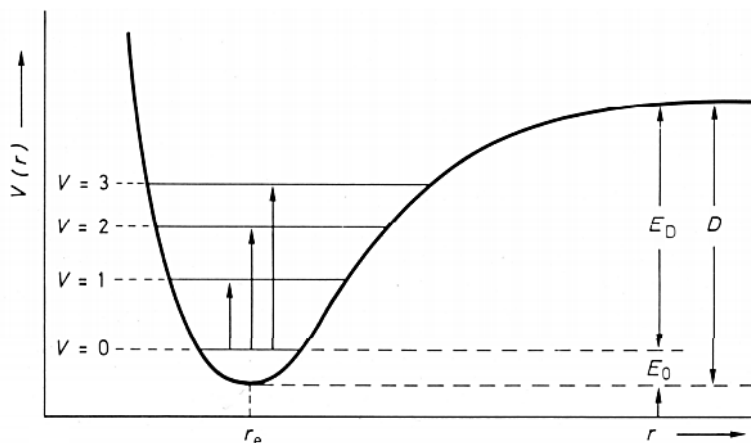
Energie fotonů infračerveného záření není postačující pro excitaci elektronů v molekulových orbitalech, ale je dostatečná ke změně vibračního stavu např. z vibrační hladiny s $v = 0$ na hladinu s $v = 1$. Této změně vibračního stavu říkáme vibrační přechod. Jelikož se velká většina molekul nachází při pokojové teplotě v základním vibračním stavu $v = 0$, ale na celé řadě různých rotačních stavů s různými rotačními kvantovými čísly, jsou nejsilnější vibrační pásy, tzv. fundamentální pásy, realizovány přechody z hladiny $v = 0$ na $v = 1$ (Holčapek, 2016; Kania, 2016).

Ve skutečnosti lze ve spektrech pozorovat více vibračních přechodů; nejen základní (fundamentální), kde nastává změna vibračního čísla o jednotku. Tyto přechody jsou vysoce pravděpodobné, s vysokou intenzitou a je zapotřebí nižší energie, tedy nižšího vlnočtu.

Dále pak vyšší harmonické (tzv. overtony), kde nastává změna vibračního čísla o více než jednotku. Tyto přechody jsou méně pravděpodobné, méně intenzivní a přechod vyžaduje vyšší energii, tedy vyšší vlnočty.

A vibrace součtové (kombinační), kde dochází k současné změně 2 vibračních čísel u polyatomové molekuly.

Vibrace polyatomové molekuly si lze představit jako soubor vibrační řady oscilátorů, jejichž pohyby jsou na sebe vázány a vzájemně se ovlivňují. Odtud vyplývá, že molekula se ve skutečnosti chová jako anharmonický oscilátor. Pohyb molekuly vede k emisi nebo absorpci záření (Holčapek, 2016; Míka et al., 2008).



Obrázek č. 6: Znárodnění energetických hladin a vibračních přechodů oscilátoru anharmonického (Němec, 2013)

$$E = h \cdot \nu \cdot \left[\left(v + \frac{1}{2} \right) - x \cdot \left(v + \frac{1}{2} \right)^2 \right]$$

$v = 0, 1, 2, \dots$

E je energie harmonického oscilátoru

$\Delta v = +1$

h je Planckova konstanta

→ základní vibrace

ν je frekvence pohybu

$\Delta v = +2, +3, \dots$

v je vibrační kvantové číslo

→ overtóny

x je anharmonická konstanta ($x = 0,01$ až $0,05$)

3.4.2.3. Druhy vibrací

Vibrace lze definovat jako změny vazebných délek a úhlů. Aby byla možné vibrace v IČ spektru pozorovat, tedy, aby byla vibrace aktivní, musí při ní docházet ke změně dipólového momentu. Polární (polarizovaná) vazba je obvykle aktivní např. C=N, vazba nepolární v symetrické molekule bude absorbovat velmi slabě, pokud vůbec, např. C=C (Novotná et al., 2016).

První skupinou jsou valenční vibrace (stretching), při nichž se mění délka vazby, ale nemění se vazebný úhel. Tyto vibrace mohou být symetrické nebo asymetrické.

Druhou skupinou jsou deformační vibrace (bending), při nichž se mění vazebný úhel, ale nemění se délka vazby. Vibrace mohou být rovinné nebo mimorovinné (Holčapek, 2016), viz Příloha č. 9.

Na natáhnutí vazby je třeba více energie než na její ohnutí, proto frekvence valenčních vibrací jsou vždy vyšší než frekvence odpovídajících deformačních vibrací dané funkční skupiny (Kania, 2016).

3.4.2.4. *Techniky pro měření IR spektra*

Koplík (2015) definuje dvě skupiny technik používaných v praxi pro měření IR spektra.

První skupinou jsou transmitanční techniky, při nichž vzorek absorbuje IR záření. Měřené veličiny jsou *transmitance*⁴ a *absorbance*⁵.

Druhou aplikovanou skupinou jsou reflektanční techniky, které se dále dělí na spekulární reflektanci, difuzní reflektanci vhodnou pro tuhé práškové vzorky a ATR neboli attenuated total reflectance (zeslabený úplný odraz) vhodnou pro pastovité vzorky. Měřenou veličinou je *reflektance*⁶.

3.4.2.5. *Interpretace IR spektra*

Pásky vibrací *funkčních skupin* se vyskytují ve spektrech v určitých konkrétních oblastech. Z analýzy spektra lze tudíž usuzovat na přítomnost určitých funkčních skupin nebo jejich přítomnost vyloučit. Je-li funkční skupina v molekule přítomna, musí spektrum vykazovat všechny absorpční pásy, které ji charakterizují (Kania, 2016; Novotná et al., 2016).

Infračervené spektrum v části *normálních vibračních přechodů* můžeme rozdělit na dvě hlavní oblasti:

Oblast vibrací valenčních (4000 – 1500 cm⁻¹)

V oblasti valenčních vibrací nalezneme charakteristické absorpční pásy *funkčních skupin*. Tuto část spektra můžeme dále rozdělit na další tři části:

- 4000 – 2500 cm⁻¹ valenční vibrace vazeb vodíku (O-H, N-H a C-H)

⁴ **Transmitance** neboli množství záření, které prošlo vzorkem: $T = \frac{I}{I_0}$, kde I je intenzita světla, které prošlo vzorkem a I_0 je intenzita světla, které do vzorku vstoupilo.

⁵ **Absorbance** neboli množství záření, které bylo pohlceno vzorkem: $A = \log \frac{I_0}{I}$

⁶ **Reflektance** neboli množství záření odraženého vzorkem: $R = \frac{I_0}{I}$ (Koplík, 2015)

- $2500 - 1900 \text{ cm}^{-1}$ absorpce trojných vazeb, oblast charakteristická pro nitrily a alkyne
- $1900 - 1500 \text{ cm}^{-1}$ absorpce dvojných vazeb, nejintenzivnější pásy $1800 - 1600 \text{ cm}^{-1}$

Oblast vibrací deformačních ($1500 - 500 \text{ cm}^{-1}$)

V oblasti $1500 - 500 \text{ cm}^{-1}$ pozorujeme deformační vibrace. Tato oblast se nazývá „oblast otisku prstu / palce“ pro danou molekulu. Tuto oblast lze jen stěží přesně interpretovat, je charakteristická pro molekulu jako celek, dochází zde totiž ke spřáhování vibrací.

Do části spektra $1250 - 1400 \text{ cm}^{-1}$ spadá také valenční vibrace vazby C-O alkoholů a fenolů (Novotná et al., 2016).

3.4.3. NIR spektrometrie

Objev NIR energie se připisuje Williamu Herschelovi, který v r. 1800 publikoval zprávu o záření za viditelnou oblastí červeného spektra. Až do začátku 2. světové války se oblast NIR pro spektroskopii nepovažovala za užitečnou, neboť NIR pásy se velice překrývají, jejich interpretace je obtížná a je k ní zapotřebí chemometrie⁷ (Míka et al., 2008).

3.4.3.1. Oblasti využití NIR spektrometrie

Praktické využití NIR dnes nabývá na popularitě. Tato technika je oblíbená pro kvantitativní analýzu.⁸ Využívá se k identifikaci strukturních jednotek v analyzovaném vzorku, kterým může být látka známá a měřením je ověřována její přítomnost, nebo látka neznámá, kdy jsou určovány její strukturní rysy a je detekována přítomnost funkčních skupin (Míka et al., 2008; Novotná et al., 2016). Podstatou NIR je, aby testovaný materiál obsahoval vazby C-H, N-H, S-H či O-H a koncentrace měřené látky v něm byla větší než 1 mg/1g . Metoda je NIR užívána v průmyslu, v potravinářství, v zemědělství a lesnictví. Její potenciál je však daleko

⁷ **Chemometrie** je disciplína, využívající matematické a statistické metody pro výběr optimálního experimentálního postupu a zpracování dat chemické analýzy. Pokrývá problematiku uspořádání pokusu, získávání informací (modelování, klasifikace a testování hypotéz a techniky k pochopení chemických mechanismů (Míka et al., 2008).

⁸ **Kvantitativní analýza** vypovídá o množství jednotlivých složek/látek ve vzorku (Bartůšek, Pazourek, 2013)

větší. Metoda je aplikovatelná pro analýzu plynů, kapalin, tuhých vzorků a pro identifikaci látek, je vhodná pro organické materiály (Karlberg, 2006; Koplík, 2015). Je uplatnitelná pro rutinní analýzy velkých sérií relativně stejnorodých vzorků, při nichž se klade důraz na rychlost, přesnost a nízké jednotkové náklady. Je to metoda nedestruktivní, vzorek není poškozen a přesto poskytuje informace o svém složení, není nutná náročnější příprava vzorků k rozborům než při standardních zkouškách, měření s vyhodnocením trvá méně než 2 minuty a simultánně lze měřit více parametrů. Měřicí přístroj ve spojení s počítačem může fungovat jako stacionární v laboratoři nebo jako mobilní (Míka et al., 2008; Novotná et al., 2016).

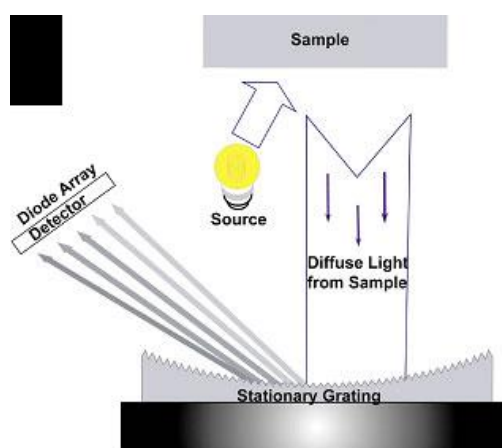
3.4.3.2. *Techniky pro měření NIR spektra*

Pro účely této diplomové práce byl použit přístroj měřící IR spektrum technikou difúzní/rozptýlené reflektance (DRIFT – Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy).

Při této metodě dopadá záření na vzorek, část je absorbována, část je odražena – odražený tok záření představuje zrcadlovou reflexi, a část je rozptýlena. Rozptýlená část je detekována. Tento efekt je nazýván difúzní reflektance a jeho předpokladem je, že úhel odraženého světla je nezávislý na úhlu dopadajícího světla – odtud rozptýlená reflektance (Novotná et al., 2016). Difuzně reflektující komponent tedy proniká částicemi vzorku a je vystaven různému stupni absorpce, než se dostane zpět či znovu vyzáří ze vzorku na různých frekvencích či vlnových délkách, vykazující zmenšení své intenzity o absorpci. Z toho je zřejmé, že T i R způsob měření poskytuje stejné absorpční profily (Míka et al., 2008).

Odražená a reflektanční složka záření závisí zejména na velikosti částic (angl. *particle size scattering*) a distribuci velikosti částic, dále na povrchu vzorku, na umístění vzorku vůči přístroji a na indexu lomu světla (Wimmer, 2015).

Metoda je vhodná především k měření práškových vzorků, zrn.



Obrázek č. 7: Princip difúzně reflektanční techniky (Perten, 2016)

3.4.3.3. Interpretace NIR spektra

NIR spektrum pevných a kapalných látek je charakteristické pásy, které se zdají být jako spojité spektrum. Tyto pásy jsou často velmi široké, aby byly seřaditelné do rozsahu tohoto spektra (Siesler et al., 2002). NIR absorpční pás se vytváří, jestliže NIR záření při specifické frekvenci vibruje na téže frekvenci jako molekulární vazba ve vzorku. V oblasti vlnočtů asi $4\,000 - 12\,500\text{ cm}^{-1}$ (cca $700 - 2700\text{ nm}$) většinou můžeme pozorovat absorpci vyšších harmonických vibrací – overtonů ($700 - 1\,800\text{ nm}$) pro vibrační přechody, jejichž základní vibrační frekvence byly ve střední infračervené oblasti (MIR) a absorpci kombinačních přechodů do MIR pásů ($1\,800 - 2\,700\text{ nm}$).

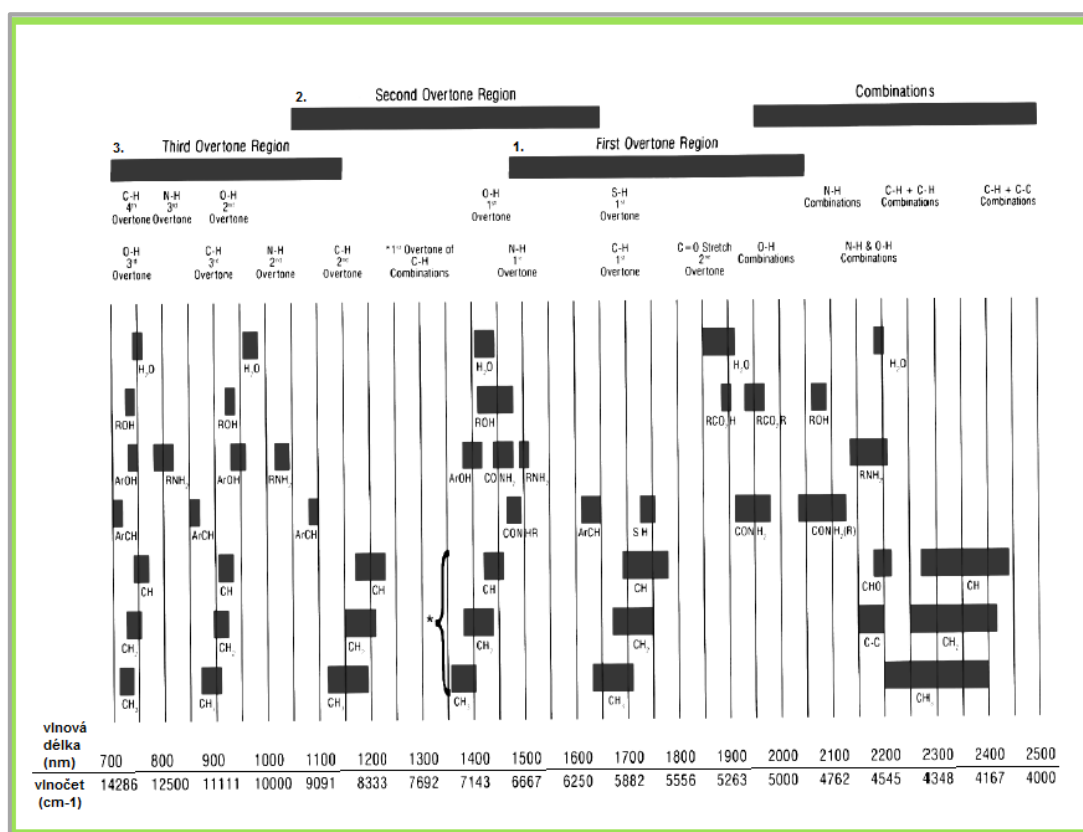
Pásy jsou definovány třemi kritérii: polohou, výškou a šířkou. Nejpřesněji lze měřit polohu pásu. Šířka pásu se měří v polovině výšky. Mnoho absorpčních pásů však této výšky nedosahuje a má tvar „ramen“. To způsobuje závažné odchylky od běžného tvaru pásu, aniž by tento dosáhl místního maxima. Výška a šířka se tedy v případě překrývání vedle sebe ležících pásů může projevit posunem pásu či změnou polohy zbývajících překrytých pásů.

Převládající pásy pro jednotlivé oblasti:

- kombinační přechody fundamentálních přechodů (cca. $4000 - 5300\text{ cm}^{-1}$),
- 1. overtóny ($4600 - 7300\text{ cm}^{-1}$)
- 2. overtóny (cca. $6000 - 10000\text{ cm}^{-1}$)
- 3. overtóny (cca. $8800 - 14500\text{ cm}^{-1}$)

Absorpční pásy NIR jsou výrazně širší ve srovnání s MIR, je zde patrná také výrazně nižší citlivost oproti střední IR. Vibrační přechod o více než jednu energetickou hladinu je méně pravděpodobný a tudíž případný přechod bude mít výrazně nižší intenzitu – nejvyšší intenzitu mají valenční vibrace vazeb C-H, N-H, O-H (Obrázek č. 8).

Většina aplikací kvantitativní analýzy prováděné v reflektanci, i přesto, že jsou absorpční pásy hůře spektrálně rozlišené, se odbývá v oblasti $1200 - 2500\text{ nm}$. Pod 1200 nm jsou totiž absorpční pásy tak slabé, že měření reflektance je obtížné, zatímco nad 2500 nm jsou absorpční pásy příliš silné a měření je rovněž obtížné (Holčapek, 2016; Míka et al., 2008).



Obrázek č. 8: Absorpční pásy vyšších harmonických přechodů (overtonů) a absorpční pásy kombinační (Matějka, 2010)

3.4.3.4. Použití NIR pro stanovení vlhkosti

Měření vlhkosti pomocí NIR spektrometrie by mělo být relativně snadné vzhledem k přítomnosti O-H vazeb, jejichž vibrace jsou v NIR spektru silně absorbovány (Burns, Ciurczak, 2008).

Kombinační absorpční pás vody je 1940 nm, první overtone je absorbován na 1440 nm.

V případě kvantitativní analýzy je nutné zabezpečit, aby vlhkost zkoumaného vzorku odpovídala rozptylu stanovenému kalibrační přístroje pro daný druh vzorků (Siesler et al., 2002).

3.4.3.5. Použití NIR pro analýzu aldehydů

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.3, formaldehyd je nejjednodušším aldehydem. Aldehydy jsou pozorovatelné v některých absorpčních pásech v NIR spektru (Tabulka č. 3), C=O vazba je však velmi dobře pozorovatelná v MIR. Přestože první vyšší harmonický přechod - overtone spadá ještě do vlnových délek spektra MIR,

druhý overtone je dostatečně silný, aby mohl být pozorován ve spektru NIR (Obrázek č. 8), byl by však zastoupen vodou při její přítomnosti.

Tabulka č. 3: Absorbční charakteristiky aldehydů (Siesler et al., 2002)

Overtone/kombinace	Vlnová délka (nm)	Vlnočet (cm ⁻¹)	Poznámka
CHO Aldehydy kombinace	2190 - 2210	4570 - 4520	CH + C=O

Obecně jsou tedy aldehydy pozorovatelné spíše v MIR spektru. Složení molekul aldehydů však umožňuje absorpci také v kombinačních pásech přechodů do MIR (Workman, Weyer, 2008).

3.4.3.6. Kalibrace přístrojů pro NIR

Kalibrace je pojem používaný k popsání postupu konverze informací o NIR absorpci do hodnot laboratorní metody. Přesnost této konverze se posuzuje na základě směrodatné odchylky kalibrace (SEC) a směrodatné odchylky predikce (standard error of performance, SEP). SEP při úspěšné NIR kalibraci bývá asi dvojnásobně veliká ve srovnání se směrodatnou odchylkou při laboratorním stanovení. Vzorky ke kalibraci by měly být odebrány z podobných souborů, které se budou měřit v budoucnosti. Rovněž i příprava (sušení, mletí, skladování atd.) by měla být podobná přípravě vzorků, které budou sériově měřeny. Je třeba získat co nejširší škálu vzorků s různým chemickým složením. Kalibrace by měla být postavena na souboru alespoň o 100 vzorcích (Míka et al., 2008).

Nastavení přístroje pro specifické skupiny je provedeno na základě změny parametrů kalibrace BIAS⁹ a slope¹⁰.

⁹ **BIAS** je systematická chyba ve sběru, analýze a interpretaci dat, která vede ke zkreslení konečných výsledků. Bias měření představuje vychýlení měření - chybu vlastní měřicí techniky, představuje hodnotu rozdílu mezi aritmetickým průměrem naměřených hodnot standardní v provozu užívanou metodou a NIR spektrometrem.

¹⁰ **Slope** regresní koeficient, definuje sklon přímky lineární funkce a její směr (Perten, 2016)

4. MATERIÁL A METODIKA

4.1. Materiál

Pro měření byly použity vzorky komerčně vyráběných DTD Lukapol a MDF Luhopol. Základní charakteristiky zkušebního materiálu jsou uvedeny v Příloze č. 1. Výrobní technologie desek Lukapol a Luhopol je detailněji popsána v kapitolách 4.1.1. a 4.1.2. dle dostupných materiálů společnosti DDL a podrobného výkladu specializovaných technologií jednotlivých výrobních linek.

Emisní třídy stanovující limity obsahu formaldehydu testovaného materiálu jsou dány mezinárodními nařízeními, viz Tabulka č. 4.

Tabulka č. 4: Emisní limity obsahu formaldehydu v deskových materiálech na bázi dřeva (IKEA, 2009; VVÚD, 2016)

OBSAH FORMALDEHYDU		IKEA Specification	E1
Evropské a světové limity	<i>DTD</i>	$\leq 4 \text{ mg /100 g}$	$\leq 8 \text{ mg /100 g}$
	<i>MDF</i>	$\leq 5 \text{ mg /100 g}$	$\leq 8 \text{ mg /100 g}$

4.1.1. Technologie výroby DTD Lukapol v DDL

Dřevotřískové desky se začaly v DDL vyrábět roku 1960 jako první deskový materiál – polotovár pro nábytkáře – v Československu. V roce 1984 byla v Lukavci vyrobena první dřevotřísková deska E1 s nízkým obsahem formaldehydu (Zuntych, 2003).

V dnešní době jsou v DDL vyráběny zejména desky třívrstvé kategorie P2 pro vnitřní vybavení (včetně nábytku) pro použití v suchém prostředí, od roku 2013 přistoupil podnik též k produkci desek jednovrstvých kategorie P5 pro nosné účely ve vlhkém prostředí.

Základními kroky při výrobě všech druhů dřevotřískových desek jsou výroba třísek, jejich úprava, nanášení lepidla a lisování.

Výrobní fáze (Heřmánek, 2014):

Volba dřevní suroviny

Výrobní technologie DTD neklade tak vysoké nároky na kvalitu dřevní suroviny jako u MDF, jsou zpracovávány méně kvalitní surové kmeny smrku, borovice, topolové krajiny, krajiny v kůře, pilařské odřezky, dřevo z těžebních zbytků, dřevo z prořezávek a probírek, tyčovina, hnědé štěpky a třísky a piliny z obrábění dřeva.

Uskladnění suroviny

Vstupní dřevní surovina je ponechána na venkovních skládkách k přirozenému prosychání. Piliny a štěpky jsou shromažďovány na skládkách, naváženy čelním nakladačem s velkoobjemovou lopatou do zásobníků či přímo doplňovány do zásobníků hrablovými dopravníky.



Obrázek č. 9: Skládka pilin a štěpky

Roztřískování

Pro produkci třívrstevných DTD je vstupní surovina roztřískována na jehličkovou a lístkovou třísku.

Výroba jehličkové třísky je realizována na prstencových roztřískovačích Pallmann PZKR 14-525 při výkonu 5,5 t mokrých třísek/ 1 hod a Klöckner KTH360 a na kladivovém mlýnu Gisiger .

Výroba lístkové třísky probíhá na roztřískovači Maier UC12/1. Při řezné rychlosti 38 m/s jsou různé sortimenty upraveny na třísku o tloušťce 0,2 – 0,6 mm.

Jednotlivé druhy třísek se skladují v zásobnících, ze kterých jsou ve stanoveném poměru společně přemístěny do sušárny třísek.

Sušení třísek

Vlhkost třísek je rozhodujícím technologickým faktorem. Přílišná vlhkost třísek prodlužuje lisovací cyklus a může vést k praskání desek. Mokré třísky jsou skladovány v silech o individuálním objemu 150 m³ a následně společně s přimísenými pilinami přesouvány hrablovými dopravníky do bubnu sušárny¹¹, kde jsou vysoušeny horkým vzduchem na konečnou vlhkost 3%. Srdcem dřevotřískové technologie je hořák Korting Hanover AG vyhřívající sušárnu spalováním brusného prachu z desek a jemného prachu odloučeného při procesu třídění třísky.



Obrázek č. 10: Bubnová sušárna třísek

Třídění třísek

Třídění vysušeného materiálu probíhá v několika fázích. Prvním stupněm je třídění na třísky *středové (SV)* a *vrchní vrstvy (VV)*. Třísky pro VV jsou domílány pro získání jemné frakce zabezpečující jemnost povrchu desek. Třísky jsou tříděny na 5 frakcí ve vibračním síťovém třídíči PAL Multicross 41-EJ. V síťovém třídíči jsou vytríděny nadrozměrné třísky, třísky SV, hrubší třísky, které lze alternativně použít do SV, ale též do VV, třísky pro VV a jemná prachová frakce. Ve vzduchových třídících jsou třísky dotříděny ve vzhledu a odloučeny nevhodné anorganické příměsi (písek).

Suché třísky jsou pneumaticky dopraveny do sila SV a VV o individuálním objemu 90 m³.

¹¹ Sušárna Owehof, Altmayer – kontinuálně rotující válec o délce 18 m, Ø 3,6 m a sušícím výkonu 11 t/ 1 hod (3,5 otáčky/ min)

Nanášení lepidla a vrstvení třískového koberce

Šnekovým dopravníkem jsou třísky jednotlivých vrstev přiváděny do polepovacího stroje. Zde je na třísky nastříkována parafinová emulze jako hydrofobizační prostředek a lepicí směs s UF lepidlem. Množství lepicí směsi se mění v závislosti na tloušťce a typu vyráběné desky.

Jemné třísky VV a hrubé třísky SV jsou postupně vrstveny na síťovou podložku – flexopodložku, na níž je třískový koberec posouván do lisu.

Lisování

Desky jsou lisovány v sedmítážovém hydraulickém lisu výrobce Siempelkamp rámové stavebnicové konstrukce vyhřívaného olejem¹². Lisovací doba je dána tloušťkou desky (Příloha č. 1). Plynné zplodiny a pára jsou z prostoru lisu odsávány axiálními ventilátory.



Obrázek č. 11: Sedmítážový lis DTD

Chlazení a klimatizace

Lisované desky jsou postupně ochlazeny v turniketu, aby bylo zabráněno hydrolýze UF lepidla. Doba chlazení se odvíjí od lisovacího času jednotlivých tlouštěk desek. Chlazení trvá 4krát dobu lisování. Ochlazené surové nebroušené desky jsou dále klimatizovány v meziskladu po dobu minimálně 48 hodin a poté broušeny.



Obrázek č. 12: Klimatizační sklad

¹² Lis Siempelkamp – délka: 6,6m; šířka: 3,45m; výška: 7,7m. Náplň termooleje: 16 000 litrů, lisovací teplota: 180-205°C, maximální výkon: 20 m³ DTD/ 1 hod.

4.1.2. Technologie výroby MDF Luhopol v DDL

Dřevovláknité desky se začaly v DDL vyrábět roku 1992 suchým procesem. Základními kroky při výrobě dřevovláknitých desek jsou výroba štěpky, její rozvláknění, nanášení lepidla, sušení, lisování.

Výrobní fáze (Jílek, 2014):

Volba dřevní suroviny

Výrobní technologie MDF klade vyšší nároky na kvalitu dřevní suroviny než DTD. Na vlákno jsou zpracovávány výřezy smrku, buku a borovice a bílá štěpka.

Výroba štěpky a uskladnění suroviny

Vstupní odkorněná dřevní surovina prochází přes detektor kovu k třínožovým bubnovým sekačkám Klöckner a je nasekána na štěpku o rozměrech: délka 40-50 mm, šířka 20 – 30 mm, tloušťka 3-5 mm. Štěpka je uskladněna ve 4 bunkrech na štěpku dle druhu suroviny (SM, BO, BK a bílá nakoupená štěpka). 5. zásobník je určen na pilinoštěpku distribuovanou z provozu pilnice.

Třídění suroviny

Pro výrobu MDF není možné zpracovat piliny. V této fázi jsou piliny odloučeny z pilinoštěpky na diskovém tříděči. Z jednotlivých zásobníků je pomocí šnekových dopravníků vynášena dřevní hmota - SM, BO, BK, bílé štěpky a pilinoštěpky v takovém poměru, který odpovídá typu a účelu použití vyráběné MDF desky. Odtud materiál pokračuje na síťový tříděč, kde je odloučena hrubá a jemná frakce.

Praní štěpky a plastifikace

Kvalitní a vytríděná štěpka postupuje do pračky štěpky. Pro praní je používána teplá voda z uzavřeného vodního okruhu. V této fázi dochází ke konečnému odloučení pilin a odstranění minerálních nečistot, zejména písku.

Nastává proces plastifikace – změkčení – při teplotě 175°C. Štěpka je penetrována párou v tlakovém předhříváči a přes šnek kónického tvaru, kde proběhne odstranění přebytečné vody, přemístována do defibrátoru.

Nečistoty (kal) z praní štěpek pro výrobu MDF jsou použity jako palivo v kotelnách.

Rozvláknění

Navazující, klíčovou výrobní operací je rozvláknění plastifikované štěpky na jednotlivá vlákna nebo shluky vláken v defibrátoru tvořeném statorem a rotorem. Tento proces je nejvíce náročný na spotřebu elektrické energie z celé výroby MDF desek. Z tlakového vařáku je změkčená štěpka dopravována šnekem (zde se dávkuje hydrofobní prostředek) do rozvláknovací mlecí komory, ve které dojde mezi pevným a rotujícím rýhovaným diskem (segmenty) k rozdělení štěpky na vlákna. V této fázi vzniká mokrá vodní suspenze, která je vyfouknuta do přepravního potrubí sušárny a do cyklónu, kde dochází k oddělení vlákna od páry. Vlhkost vlákna na výstupu je 7-11% podle tloušťky vyráběné desky.

Přimísení lepidla

Napařením štěpky dojde k částečnému uvolnění ligninu, který při lisování působí jako pojivo. V tzv. BLOWLINE sekci (mezi defibrátorem a sušárnou vlákna) dochází k přimísení lepidlové směsi složené z močovinoformaldehydového lepidla, močoviny a vody.

Sušení

Směs je přemístována potrubím společně se vzduchem (9 tun vlákna/ 1 hod), kde dochází k jejímu nepřímému vysoušení. Vlhkost vlákna je regulovaná v rozmezí 7 - 11%. Parní registry jsou srdcem provozu MDF technologie. Slouží k vysoušení vlákna. Dochází zde k přeměně skupenství a oddělení vody z dřevního vlákna.

Vrstvení dřevovláknitého koberce

Vlákno je shromažďováno ve vrstvicím zásobníku pro vrstvičku, kde je vyčesáváno. Je nanášeno na vrstvicí pás a je kontrolována jeho plošná hmotnost (kg/m^2) pásovou váhou.

Lisování

Navrstvený koberec postupuje přes předhustovač a předlis ke krácení koberce na odpovídající délku pomocí kotoučové pily. Odtud pokračuje do hydraulického etážového lisu se 4 etážemi. Lisovací čas a tlak je specifický dle technologického postupu pro jednotlivé tloušťky desek. Zásadou lisování je dodržení optimální vlhkosti. Příliš vlhké vlákno může vést k roztrhnutí desek v lisu, příliš suché vlákno k nevytvrzení lepidla.



Obrázek č. 13: Krácení navrstveného dřevovláknitého koberce kotoučovou pilou

Chlazení a klimatizace

Hotové desky jsou ochlazovány v turniketu, naskladněny a uloženy k vyzrání. Minimální doba klimatizace MDF je 24 hodin před broušením.

4.1.3. Stanovení počtu zkušebních vzorků

Experimentální měření bylo realizováno v období od března do května 2015. Po tuto dobu byl společnosti DDL zapůjčen přístroj Perten DA7250. Počet a typ zkušebních vzorků byl stanoven množstvím realizované výroby v tomto období a závislý na provedených extrakcích dle ČSN EN 120; specifikace analyzovaných vzorků viz Příloha č. 10 a Příloha č. 11.

4.1.4. Rozměry a odběr zkušebních těles

Zkušební tělesa konkrétních stanovených rozměrů pro jednotlivé metody byla odebrána ze středových částí desek. Tělesa byla pravoúhlá, vyřezaná z broušených desek s přesností $\pm 0,2\text{mm}$, zbavena prachu a nečistot a uchována v neprodyšných vzduchotěsných obalech.

4.1.4.1. Zkušební vzorky pro perforátorovou metodu dle ČSN EN 120

Odběr těles pro zjišťování obsahu formaldehydu v DTD a MDF dle ČSN EN 120 byl realizován dle pokynů Oddělení řízení jakosti podniku. Vzorky z desek jednotlivých emisních tříd byly odebrány vždy v závislosti na stanoveném čase (Tabulka č. 5) a dále dle specifických doplňujících podmínek (změna typu lepidla, zvýšení množství použitého lepidla, přechod výroby na jinou tloušťkovou třídu, změna lisovacího času).



Obrázek č. 14: Vzorky DTD a MDF pro perforátorovou metodu

Zkušební tělesa byla vyhotovena dle nářezových plánů DDL – Pracovní postup 1.16, 1.18 (Příloha č. 2 a Příloha č. 3) o rozměrech 25 mm x 25 mm při konkrétní tloušťce desky. Celková hmotnost odebraného zkušební vzorku byla 250 g (DDL, 2004).

Tabulka č. 5: Pokyny pro odběr vzorků DTD a MDF v DDL

Emisní třída/limit	E1	IKEA Specification
Stanovený čas odběru vzorků	<i>jedenkrát za 24 hodin</i>	<i>po 8 – 12 hodinách</i>

4.1.4.2. Zkušební vzorky pro NIR spektrometrii

Zkušební tělesa byla vyhotovena dle nářezových plánů DDL – Pracovní postup 1.16, 1.18 (Příloha č. 2 a Příloha č. 3) o rozměrech 50 mm x 30 mm při konkrétní tloušťce desky. Počet těles pro jeden zkušební vzorek byl dán tloušťkou desky.

Odběr zkušebních těles pro NIR spektrofotometr byl proveden vždy souběžně s odběrem vzorků pro perforátorovou metodu.

4.1.4.3. Zkušební vzorky pro stanovení vlhkosti

Zkušební tělesa pro stanovení vlhkosti desek byla identická s tělesy pro stanovení obsahu Fd pro jednotlivé zkušební metody a byla odebrána současně. Velikost a rozměry zkušebních vzorků jsou specifikovány jednotlivými metodami.

4.2. Metodika

Měření probíhala ve zkušební laboratoři Dřevozpracujícího družstva Lukavec vybavené veškerými potřebnými zařízeními.

4.2.1. Stanovení obsahu uvolnitelného Fd – Extrakční postup zvaný „perforátorová metoda“ dle ČSN EN 120

Měření obsahu formaldehydu bylo realizováno v laboratoři Dřevozpracujícího družstva Lukavec na základě Manuálu laboratoře C 1.9 vypracovaného dle normovaného postupu ČSN EN 120 (1994b) schváleného vedením podniku.

Sběr dat z extrakčního postupu byl realizován v období březen – květen 2015.

4.2.1.1. *Extrakční postup*

Extrakce

Pro měření obsahu formaldehydu pro interní účely byla provedena jedna extrakce.

Zkušební vzorek o hmotnosti 110 g ($\pm 0,1$ g) byl navážen na laboratorní digitální váze Kern EW (s přesností vážení 0,001g) a vložen do varné baňky s kulovým dnem. Do baňky bylo přidáno 600ml toluenu, byla nasazena kónická redukce pro propojení s perforátorem a baňka umístěna do topného hnízda. Perforátor s důsledně vymytou fritou byl upevněn pomocí držáků a propojen s baňkou. Do perforátoru byla nalita destilovaná voda tak, aby nedocházelo k zanášení destilované vody do varné baňky. Mezi hladinou vody a výtokovým otvorem přepadu byla zachována vzdálenost 20 – 30 mm. Byl připojen chladič a pohlcovač plynů – vodní uzávěr, v němž bylo obsaženo 70 ml destilované vody. Po sestavení přístroje bylo zapnuto vyhřívání a chlazení



Obrázek č. 15: Extrakční přístroj

a zkontrolováno nastavení regulátoru (Obrázek č. 13). Extrakce započala, jakmile první kapičky toluenu začaly stoupat vzhůru. Extrakce trvala 2 hodiny od tohoto okamžiku. V průběhu extrakce byl zajištěn průtok 70-90 kapek za minutu. Po ukončení extrakce bylo vypnuto chlazení, uvolněn uzávěr a vypnuto zahřívání. Po ochlazení roztoku v perforátoru na pokojovou teplotu okolí byla odpuštěna voda do odměrné baňky, odstraněn kulový uzávěr a přes chladič prolito 200 ml destilované vody. Chladič byl odpuštěn, odstraněn a perforátor promyt dalšími 200 ml destilované vody. Veškerý vodný roztok byl přelit do baňky o objemu 2000 ml (Obrázek č. 14), doplněn po rysku destilovanou vodou a důsledně promíchán.

Stanovení obsahu Fd

Z odměrné baňky (2000 ml) bylo odpipetováno 10 ml roztoku do suché odměrné baňky o objemu 50 ml, přidáno 10 ml acetylacetonového roztoku a 10 ml octanu amonného. Souběžně byl stejným postupem připraven slepý pokus s destilovanou vodou místo vzorku. Baňka byla uzavřena, roztok protřepán a umístěn do vodní lázně temperované na teplotu 40 °C. Reakce byla ponechána v běhu po dobu 15 min, následně byl vzorek umístěn na 1 hod do temna a ochlazen na teplotu 20 °C. Spektrofotometr Specord 40 byl zapnut 15 min před pokusem. Vzorky byly přelity do očištěných a osušených kyvet. Do držáku kyvet byl nejprve umístěn slepý pokus, poté standardní pokusný vzorek. Byla provedena analýza vzorků spektrofotometrem založená na Hantzschově reakci, při které formaldehyd ve vodou zředěném roztoku reaguje za přítomnosti amoniových iontů a acetylacetonu při absorpčním maximu 412 nm. Tato reakce je specifická pro formaldehyd.



Obrázek č. 16: Odměrné baňky 2000 ml s roztokem formaldehydu

Stanovení perforátorového čísla

Obsah formaldehydu v deskách je definován perforátovým číslem vyjádřený v mg Fd/100 g absolutně suché desky.

Perforátorové číslo se vypočítá dle vzorce:

$$\text{Perforátorové číslo} = \frac{A_s \times f \times (100 + H) \times V}{m_H}$$

<i>perfor. číslo</i>	je obsah formaldehydu [mg/100g]
<i>f</i>	je faktor kalibrační funkce [mg/ml]
<i>A_s</i>	je extinkce analyzovaného extrakčního roztoku dle Specord 40
<i>V</i>	je objem odměrné baňky 2000 ml
<i>m_H</i>	je navážka vzorku podstupujícího extrakci [g]
<i>H</i>	je vlhkost stanoveného vzorku v [%]

4.2.1.2. Měření vlhkosti

Měření vlhkosti těles probíhalo souběžně s extrakcí dle pracovního postupu podniku C 1.3 vycházejícího z ČSN EN 322 (1994a).

Podstatou zkoušky je výpočet ztráty hmotnosti (v procentech) z hmotnosti zkušební tělesa po vysušení, tzv. gravimetrická neboli váhová metoda.

70 g zkušebních těles (25 mm x 25 mm) bylo odváženo na digitální laboratorní váze s přesností ± 2 g a vzorek byl uložen do sušárny Memmert (Obrázek č. 17), dokud nebylo dosaženo konstantní hmotnosti. Konstantní hmotnosti bylo docíleno po uložení v sušárně při teplotě (103 ± 2)°C, když se naměřené hodnoty hmotnosti (v intervalu 6 hod) od sebe vzájemně nelišily o víc než 0,1 % hmotnosti zkušební tělesa. Po sušení byla zkušební tělesa ochlazená v exsikátoru na teplotu místnosti. Vysušené vzorky byly zváženy na digitální váze Kern EW.



Obrázek č. 17: Sušárna vzorků Memmert

Vlhkost zkušebních těles byla vypočtena dle vzorce:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \quad [\%]$$

w je vlhkost zkušebního tělesa v procentech hmotnosti [%]

m_w je hmotnost zkušebního tělesa před vysušením [g]

m_0 je hmotnost zkušebního tělesa po vysušení [g]

Tabulka č. 6: Limitní interval pro vlhkost desek (DDL, 2016)

Typ desky	DTD	MDF
Vlhkost	5 – 13 %	4 – 11 %

4.2.2. Stanovení obsahu uvolnitelného Fd pomocí NIR spektrometrie

Analýza zkušebních těles byla provedena na přístroji Perten DA7250 reflektanční technikou difuzní reflektance, technické parametry přístroje viz Příloha č. 6.

Na úvodní obrazovce byl sepnut mód „Analyze“ (Obrázek č. 18) a otevřeno menu analýzy vzorku. Po spuštění přístroje byla zkušební tělesa specifické tloušťky představující jeden zkušební vzorek umístěna na snímanou plochu přístroje. Plocha sestavy těles byla umístěna ve vzdálenosti ± 2 mm od hrany měřicího přístroje. Celková délka vzorku po seskupení těles povrchovou vrstvou vedle sebe (Obrázek č. 19) byla minimálně 120 mm (v závislosti na charakteristické tloušťce desky).

Na obrazovce přístroje byla v menu zvolena analýza „WOOD PANELS EDGE“ registrovaná v systému přístroje. Došlo k otevření okna zobrazujícímu analyzované vlastnosti „Perforator value“ - As is a „Moisture“. Přes pole „Analyze“ proběhlo otevření registračního okna vzorku. Identifikační označení vzorku bylo uloženo do systému dle typu desky a čísla vzorku:



Obrázek č. 19: Úvodní menu přístroje Perten 7250 (Perten, 2014)



Obrázek č. 18 Sestavený zkušební vzorek (Perten, 2014)

M (MDF), P (DTD) do kolonky „Sample ID“. Po zadání specifického označení vzorku byla spuštěna přes tlačítko „Continue“ samotná analýza (Obrázek č. 20).

Klapka zakrývající zdroj záření byla odsunuta a vzorek osvětlen žárovkou bílého světla. Část světla specifické vlnové délky byla v tuto chvíli vzorkem absorbována, zbytek světla byl odražen zpět do přístroje. V přístroji proběhlo rozložení světla pomocí difrakční mřížky na jednotlivé vlnové délky. Každá z těchto vlnových délek byla změřena specifickým detektorem (v přístroji je užito 256 detektorů) pro zjištění množství odraženého světla.

Po provedení prvního měření byl vzorek posunut a podruhé změřen. Pro třetí a čtvrté měření totožného vzorku byla sestava těles převrácena o 180° a analyzována opět na dvou místech. Po závěrečném měření byla vygenerována výsledná hodnota F_d a vlhkosti zkoumaného vzorku (Obrázek č. 21). Přes tlačítko „Analyze“ bylo postoupeno k registraci dalšího vzorku.

Naměřené hodnoty byly uloženy do interního systému přístroje jako systematický seznam (Příloha č. 7) a následně exportovány do formátu xls.

Výsledné hodnoty bylo možné kontrolovat a editovat přímo v systému přístroje přes tlačítko „Reporting“ dle data měření nebo ID vzorku (Příloha č. 8).



Obrázek č. 20: Analýza vzorku NIR zářením (Perten, 2014)



Obrázek č. 21: Perforátorová hodnota a vlhkost změřená NIR spektrometrem (Perten, 2014)

4.2.3. Zpracování naměřených dat

Naměřené hodnoty perforátorovou metodou a hodnoty získané z NIR spektrometru byly analyzovány a statisticky vyhodnoceny.

5. VÝSLEDKY A DISKUZE

Pro statistické analýzy a zpracování naměřených hodnot byl použit program PASW Statistics 18 SPSS.

5.1. Základní statistické ukazatele

U naměřených charakteristik (obsah Fd a vlhkost) dvěma specifickými metodami – Perforátorová metoda dle ČSN EN 120 (1994b) a experimentální měření NIR spektrometrem Perten DA 7250 byly odvozeny základní statistické ukazatele pro jednotlivé skupiny zkoumaných desek: počet platných měření n , aritmetický průměr \bar{x} , směrodatná odchylka s , variační koeficient v a rozpětí vyjádřené minimem (*min.*) a maximem (*max.*). Tyto ukazatele umožňují ucelený náhled na analyzovaný soubor dat.

Tabulka č. 7: Základní statistické ukazatele analyzovaného souboru

DTD + MDF komplet	\bar{x} (mg/100g)	s	v (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL Fd (EN 120)	3,99	1,27	31,9	1,89	7,10
NIR Perten Fd	7,84	2,78	35,5	3,28	13,33

$n = 121$

Tabulka č. 7 ukazuje rozdílnost průměrů. V případě NIR spektrometrie je průměrná hodnota téměř dvojnásobná ve srovnání s perforátorovou metodou. Variační koeficient poukazuje na přibližně stejnou variabilitu naměřených hodnot.

V následujícím kroku byl soubor rozdělen na skupiny dle typu desky a dle emisní třídy (Tabulka č. 8 a č. 9).

Tabulka č. 8: Základní statistické ukazatele pozorovaných DTD a MDF

DTD	\bar{x} (mg/100g)	s	v (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL Fd (EN 120)	3,31	1,50	45,3	1,89	7,10
NIR Perten Fd	10,84	1,21	11,2	8,80	13,33

$n = 50$

MDF	\bar{x} (mg/100g)	s	v	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL Fd (EN 120)	4,47	0,80	11,5	2,81	6,94
NIR Perten Fd	5,69	1,10	15,3	3,28	7,17

$n = 71$

Tabulka č. 9: Základní statistické ukazatele pro emisní třídu E1 a IKEA Sp.

E1	\bar{x} (mg/100g)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL Fd (EN 120)	6,03	0,74	12,3	4,46	7,10
NIR Perten Fd	10,51	2,95	28,1	5,95	13,33
<i>n</i> = 19					
E IKEA Sp.	\bar{x} (mg/100g)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL Fd (EN 120)	4,27	1,74	40,7	1,89	4,99
NIR Perten Fd	4,46	0,49	11,0	2,81	7,17
<i>n</i> = 102					

5.1.1. Vlhkost

Stanovení vlhkosti materiálů nebylo primárně předmětem této DP. Yu, Crump (1999) uvádí, že hodnota perforátorového čísla může být závislá na vlhkosti materiálu. Vlhkost ovlivňuje celý průběh extrakce a přítomnost volného formaldehydu v deskách reagujícího s vodou má následně vliv na množství jeho emise.

Vlhkost DTD spadá do intervalu povolené vlhkosti DDL jak při měření vlhkosti gravimetrickou metodou dle ČSN EN 322, tak při měření pomocí NIR (Tabulka č. 10).

Tabulka č. 10: Vlhkost DTD E1

DTD E1	\bar{x} (%)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL vlhkost	6,26	0,85	13,5	5,45	8,65
NIR Perten vlhkost	6,52	0,54	8,3	5,70	7,80
<i>n</i> = 12					

Vlhkost DTD IKEA Sp. spadá v případě obou použitých metod do intervalu povolené vlhkosti společností DDL (Tabulka č. 11).

Tabulka č. 11: Vlhkost DTD IKEA Specification

DTD IKEA Sp.	\bar{x} (%)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL vlhkost	5,40	0,61	11,3	4,38	7,45
NIR Perten vlhkost	6,13	0,58	9,5	5,00	7,30
<i>n</i> = 38					

V případě MDF E1 a MDF IKEA Specification vyhovují max. hodnoty vlhkosti naměřené oběma metodami stanoveným limitům (Tabulka č. 12 a č. 13).

Tabulka č. 12: Vlhkost MDF E1

MDF E1	\bar{x} (%)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL vlhkost	6,20	0,71	11,5	5,32	7,61
NIR Perten vlhkost	6,11	0,31	5,1	5,50	6,50

n = 7

Tabulka č. 13: Vlhkost MDF IKEA Specification

MDF IKEA Sp.	\bar{x} (%)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL vlhkost	6,37	1,06	16,6	4,02	8,60
NIR Perten vlhkost	6,33	0,70	11,1	4,80	7,70

n = 64

Vlhkost desek změřená NIR spektrometrem se liší od hodnot zjištěných váhovou metodou v průměru o 0,04. V případě vlhkosti lze tedy již v tomto bodě poukazovat na možnost praktického využití NIR spektrometrie. OH skupiny (kapitola 3.4.3.5.) jsou v NIR spektru dobře absorbovatelné, je proto možné očekávat, že měření vlhkosti NIR spektrometrem bude pro provozní účely dostatečně přesné. Předpokladem pro toto tvrzení je také fakt, že společnost Perten založila kalibraci přístroje DA 7250 na více než 400 pokusných měřeních vlhkosti materiálů na bázi dřeva dle EN 322 (Perten, 2015).

Toto tvrzení je dále ověřeno regresní analýzou viz kapitola 5.2.1.

5.1.2. Obsah formaldehydu

Hodnoty obsahu Fd stanovené perforátorovou metodou spadají do povoleného limitu pro emisní třídu E1, hodnoty naměřené přístrojem Perten jsou v případě DTD významně odlišné (Tabulka č. 14). Tato skutečnost je pravděpodobně dána nastavením kalibračních parametrů přístroje, může být však způsobena difúzní reflektanční technikou NIR jako takovou.

Tabulka č. 14: Obsah Fd v DTD E1

DTD E1	\bar{x} (mg/100g)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL Fd (EN 120)	5,83	0,80	13,7	4,46	7,10
NIR Perten Fd	12,67	0,46	3,6	11,85	13,33

n = 12

Tabulka č. 15 poukazuje na velmi nízkou průměrnou hodnotu obsahu Fd u DTD vyrobených dle IKEA Sp. stanovenou DDL. Hodnoty naměřené přístrojem

Perten DA7250 jsou ve srovnání s extrakčním postupem stejně jako v případě DTD E1 značně odlišné.

Tabulka č. 15: Obsah Fd v DTD IKEA Specification

DTD IKEA Sp.	\bar{x} (mg/100g)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL Fd (EN 120)	2,51	0,27	10,8	1,89	3,08
NIR Perten Fd	10,26	0,68	6,7	8,80	11,69

n = 38

V případě MDF E1 vyhovují max. hodnoty obsahu Fd naměřené oběma metodami stanoveným limitům (Tabulka č. 16).

Tabulka č. 16: Obsah Fd v MDF E1

MDF E1	\bar{x} (mg/100g)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL Fd (EN 120)	6,39	0,48	7,5	5,65	6,94
NIR Perten Fd	6,79	0,51	7,5	5,95	7,27

n = 7

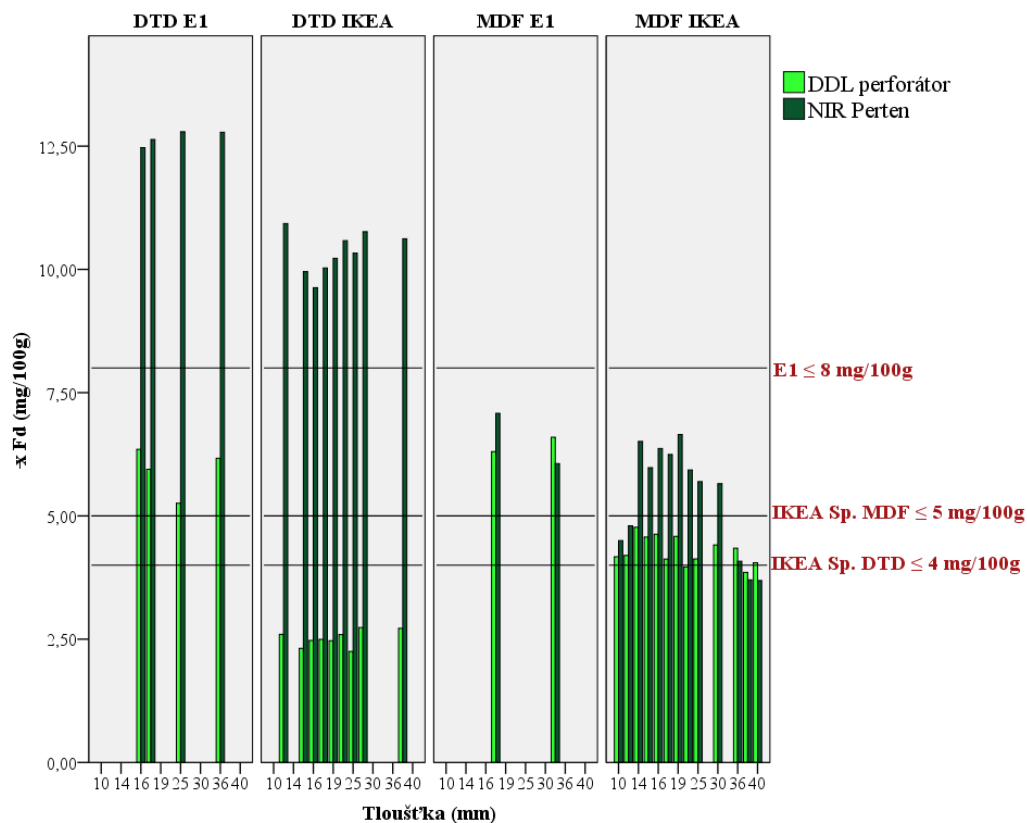
V případě MDF IKEA Sp. byl při analýze vzorků přístrojem DA7250 překročen emisní limit pro IKEA Specification v průměru o 0,61mg/100g (Tabulka č. 17). Přestože je analýza vzorků pomocí NIR spektrometrie velice rychlá, práce na přístroji Perten uživatelsky nenáročná a intuitivní, bylo pozorováno, že soubor vzorků změřený NIR spektrometrem vykazuje v porovnání s perforátorovou metodou značnou variabilitu způsobenou velkými rozdíly mezi jednotlivými tloušťkami desek, jak je patrné z Grafu č. 3.

Tabulka č. 17: Obsah Fd v MDF IKEA Specification

MDF IKEA Sp.	\bar{x} (mg/100g)	<i>s</i>	<i>v</i> (%)	<i>min.</i>	<i>max.</i>
DDL Fd (EN 120)	4,27	0,50	11,7	2,81	4,99
NIR Perten Fd	5,61	1,09	19,4	3,28	7,17

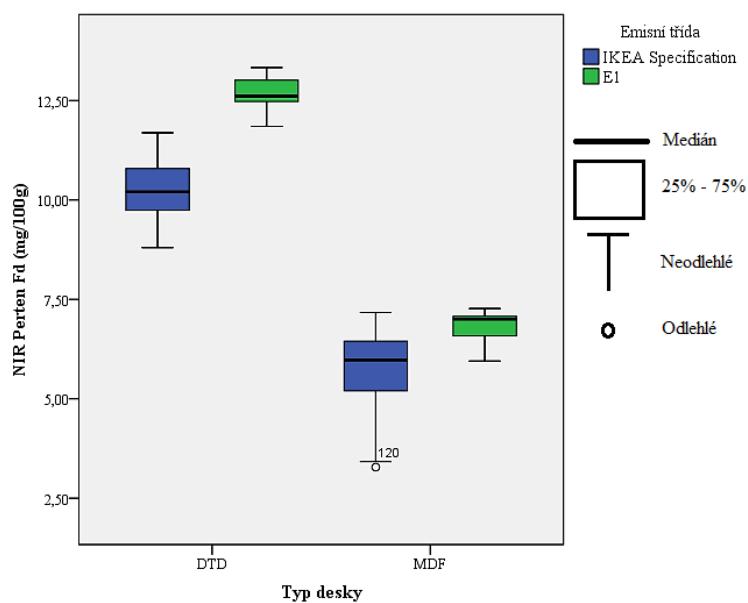
n = 64

Rozdíl v průměrných hodnotách obsahu Fd dle jednotlivých typů desek a dle specifických emisních tříd je evidentní. Tyto rozdíly pravděpodobně budou znamenat nutnost rozdílných nastavení přístroje pro jednotlivé skupiny.



Graf č. 3: Porovnání obsahu Fd v DTD a MDF stanoveného perforátorovou metodou a pomocí NIR spektrometrie – diferenciace dle tloušťky desek

Variabilita souboru dat naměřeného NIR spektrem je zobrazena v Grafu č. 4. Tento krabicový graf poukazuje na evidentní rozdílnost naměřeného obsahu Fd u DTD a MDF.



Graf č. 4: Variabilita naměřených hodnot obsahu Fd v DTD a MDF

U emisní třídy E1 byly očekávány vyšší hodnoty obsahu Fd u MDF než u DTD. Tento předpoklad však nebyl naplněn. Lze usuzovat, že rozdíl mezi výslednými hodnotami může být způsoben rozdílnou strukturou desek na průřezu. Hrubá frakce třísky, ve srovnání se zhuštěným dřevním vláknem, může vést k vyšší absorpci a nižší reflektanci IR záření vzorkem, a tudíž k řádově odlišným výsledným hodnotám obsahu Fd.

5.2. Korelace a regrese

5.2.1. Analýza vybraných závislostí kompletního souboru dat

Aby bylo možné prokázat uplatnitelnost NIR spektrometru DA 7250 pro stanovení obsahu Fd v třívrstvých dřevotřískových deskách a dřevovláknitých deskách se střední hustotou vyráběných v DDL, bylo nutné definovat existenci statisticky významného vztahu mezi hodnotami získanými perforátorovou metodou a NIR spektrometrií. Za tímto účelem byly zkoumány závislosti:

NIR Perten Fd \leftrightarrow DDL perforátor Fd

NIR Perten Fd \leftrightarrow NIR Perten vlhkost

DDL vlhkost \leftrightarrow NIR Perten vlhkost

DDL vlhkost \leftrightarrow DDL perforátor Fd

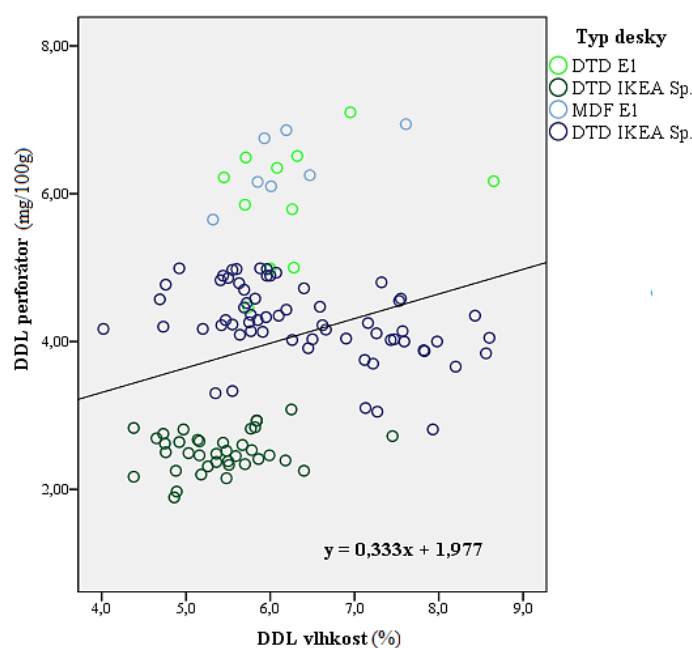
Naměřené hodnoty byly podrobeny regresní analýze, byl určen Pearsonův korelační koeficient stanovující sílu závislosti mezi proměnnými a koeficient determinace udávající úspěšnost regrese.

V prvním kroku byly hodnoceny kolektivně všechny naměřené případy bez ohledu na typ desky a emisní třídu. Statisticky významná závislost byla pozorována v případě vztahu *DDL vlhkost* ↔ *NIR Perten vlhkost* viz kapitola 5.2.1.1., byla též pozorována menší míra závislosti u *DDL vlhkost* ↔ *DDL perforátor Fd*, viz kapitola 5.2.1.2., závislost mezi *NIR Perten Fd* ↔ *DDL perforátor Fd* nebyla pozorována lineární korelační závislost.

5.2.1.1. Vztah mezi vlhkostí DDL a obsahem Fd naměřeným perforátorovou metodou DDL

Graf č. 5 zobrazuje lineární závislost mezi DDL perforátorem a DDL vlhkostí. Tato závislost byla regresní analýzou popsána s hodnotou korelačního koeficientu $r = 0,26$, jedná se o nízký stupeň korelační závislosti (Biskup, 2008).

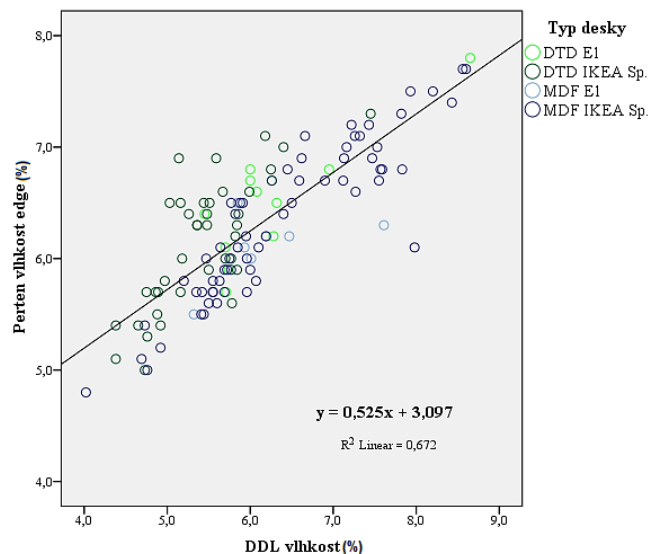
Mezi Perten naměřenou vlhkostí a Perten zjištěným obsahem Fd je téměř nulová lineární závislost ($R^2 = 0,068$). Tento fakt je pravděpodobně způsoben značnou rozdílností naměřených hodnot obsahu Fd mezi přístrojem Perten a perforátorovou metodou v porovnání s rozdílností naměřené vlhkosti váhovou metodou a přístrojem Perten



Graf č. 5: Vztah mezi vlhkostí (dle ČSN EN 322) a obsahem Fd stanovenými DDL

5.2.1.2. Vztah mezi vlhkostí DDL a vlhkostí NIR Perten

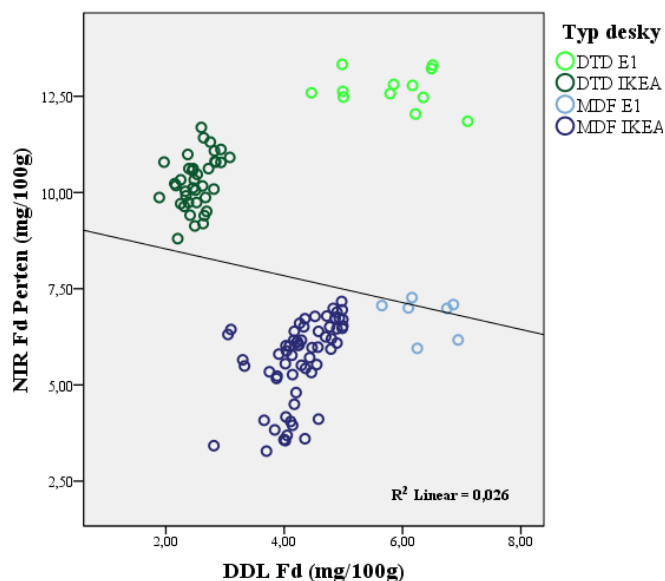
Regresní analýza prokázala statisticky významnou závislost ($R^2 = 0,67$) mezi vlhkostí testovaných materiálů stanovenou gravimetrickou metodou DDL a vlhkostí změřenou pomocí NIR spektrometrie (Graf č. 6). Změna vlhkosti Perten v závislosti na vlhkosti DDL je popsána lineární funkcí ze 67%.



Graf č. 6: Závislost mezi vlhkostí desek DDL (dle ČSN EN 322) a vlhkostí změřenou přístrojem Perten DA 7250

5.2.1.3. Vztah mezi obsahem Fd NIR Perten a obsahem Fd naměřeným perforátorovou metodou DDL

Provedená regresní analýza ($r = 0,16$) poukazuje na absenci lineární závislosti mezi pozorovanými veličinami. Při stávajícím nastavení přístroj Perten DA 7250 neumožňuje měření obsahu Fd. Při pohledu na Graf č. 7 je patrné, že variabilita souboru je dána různými typy desek DTD E1, DTD IKEA Sp., MDF E1 a MDF IKEA Sp., což může komplikovat analýzy. V dalších analýzách budou řešeny jednotlivé skupiny zvlášť.



Graf č. 7: Závislost mezi obsahem Fd stanoveným perforátorovou metodou a pomocí NIR spektrometrie pro všechna pozorování DTD a MDF

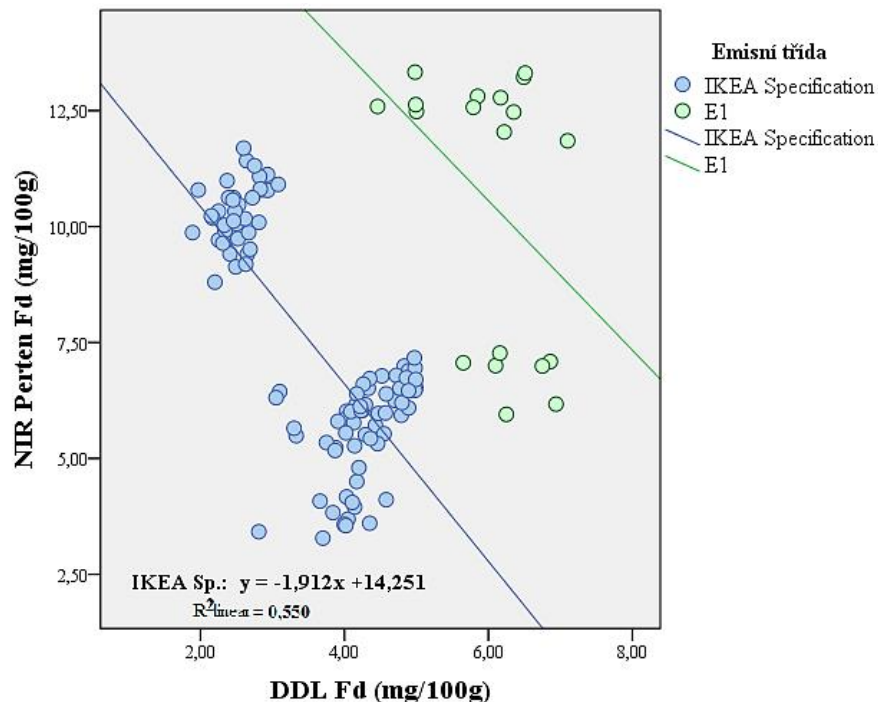
5.2.2. Analýza vybraných závislostí dle typů desek a dle emisních tříd

Vzhledem k faktu, že mezi obsahem Fd stanoveným perforátorovou metodou a hodnotami obsahu Fd vygenerovanými NIR spektrometrem na bázi kompletního souboru dat nebyla pozorována statisticky významná závislost, bylo přistoupeno k testování vztahu obsahu Fd naměřeného NIR metodou a obsahu Fd naměřeného perforátorovou metodou zvláště pro skupinu typů desek a pro skupinu emisních tříd.

5.2.2.1. *Emisní třídy - vztah mezi obsahem Fd stanoveným perforátorovou metodou a NIR spektrometrií*

Regresní analýza zaměřená na emisní třídy prokázala statisticky významnou lineární závislost mezi perforátorem a NIR v případě IKEA Specification (Graf č. 8). Vzhledem k faktu, že Pearsonův korelační koeficient má hodnotu $r = 0,741$ a spadá do intervalu $(0,7;0,9)$, můžeme hovořit o silné lineární závislosti (Biskup, 2008).

V případě desek z emisní třídy E1 nebyl pozorován žádný statisticky významný lineární vztah.



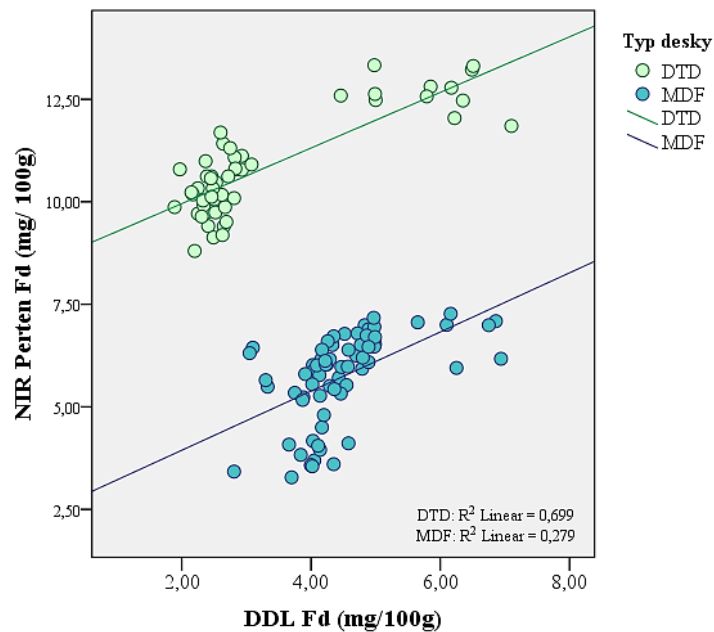
Graf č. 8: Závislost mezi obsahem Fd stanoveným perforátorovou metodou a pomocí NIR spektrometrie emisní třídy E1 a IKEA Specification

Změna nastavení přístroje dle emisních tříd byla s přihlédnutím k nízké korelovanosti veličin u IKEA Sp. a neprokázané závislosti mezi zkušebními metodami pro emisní třídu E1 nebyla doporučena. Případné návrhy změn v nastavení parametrů kalibrace přístroje Perten DA 7250 byly orientovány na jednotlivé typy desek.

5.2.2.2. Typ desek - vztah mezi obsahem Fd stanoveným perforátorovou metodou a NIR spektrometrií

Koeficient determinace ($R^2 = 0,89$) poukazuje na silný vliv typu desky na obsah Fd naměřený NIR spektrometrem.

Graf č. 9 pak zobrazuje korelaci mezi naměřenými hodnotami obsahu Fd perforátorovou metodou a NIR spektrometrem pro oba testované druhy desek (DTD a MDF).



Graf č. 9: Závislost mezi naměřenými hodnotami obsahu Fd perforátorovou metodou a NIR spektrometrem pro skupinu DTD a MDF

Tabulka č. 18 je výstupem z programu SPSS a zobrazuje hodnoty koeficientu pro model lineární závislosti mezi NIR spektrometrickou metodou a perforátorovou metodou pro skupinu desek DTD

Tabulka č. 18: Závislost mezi hodnotami obsahu Fd naměřenými perforátorovou metodou a pomocí NIR spektrometrie

Coefficients ^{a,b}						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	8,599	,233		36,935	,000
	DDLperforátor	,678	,064	,836	10,557	,000

a. Dependent Variable: NIR Perten Fd

b. Selecting only cases for which Typ desky = DTD E1, DTD IKEA Sp.

Vztah mezi perforátorem a NIR je v případě DTD popsán lineární funkcí danou předpisem:

$$y = 0,678 * x + 8,599$$

Koeficient determinace je $R^2 = 0,699$. Jedná se o vysoký stupeň korelační závislosti. Pearsonův korelační koeficient $r = 0,836$.

V případě MDF je vztah mezi oběma metodami popsán lineární funkcí danou předpisem:

$$y = 0,721 * x + 2,498$$

Koeficient determinace má hodnotu $R^2 = 0,279$. Pearsonův korelační koeficient ($r = 0,528$) specifikuje, že se jedná o střední stupeň korelační závislosti (Biskup, 2008).

S přihlédnutím k provedeným analýzám, při nichž byla porovnána síla závislosti mezi perforátorovou metodou a NIR spektrometrií na úrovni emisních tříd a na úrovni typů desek, bylo po zhodnocení míry korelace a konzultaci s Ing. René Bienem, zástupcem společnosti Perten pro ČR dále zhodnoceno, že síla lineární závislosti u DTD je aplikovatelná pro změnu nastavení parametrů kalibrace a že není dále nutné skupinu DTD štěpit dle emisních tříd.

U MDF bylo přistoupeno k hlubšímu zkoumání ovlivňujících faktorů.

V následujícím kroku byly testovány další ovlivňující faktory. Za faktor mající vliv na obsah Fd změřený přístrojem Perten DA 7250 lze považovat variabilitu tloušťek desek.

5.2.2.3. Zhodnocení závislosti mezi tloušťkou desek a obsahem Fd stanoveným pomocí NIR spektrometrie

Dalším krokem bylo zhodnocení závislosti mezi tloušťkami desek a hodnotami obsahu Fd naměřenými pomocí NIR. Regresní analýzou byla zjištěna lineární závislost mezi tloušťkou desek a obsahem Fd na úrovni celého souboru dat, viz Tabulka č 19.

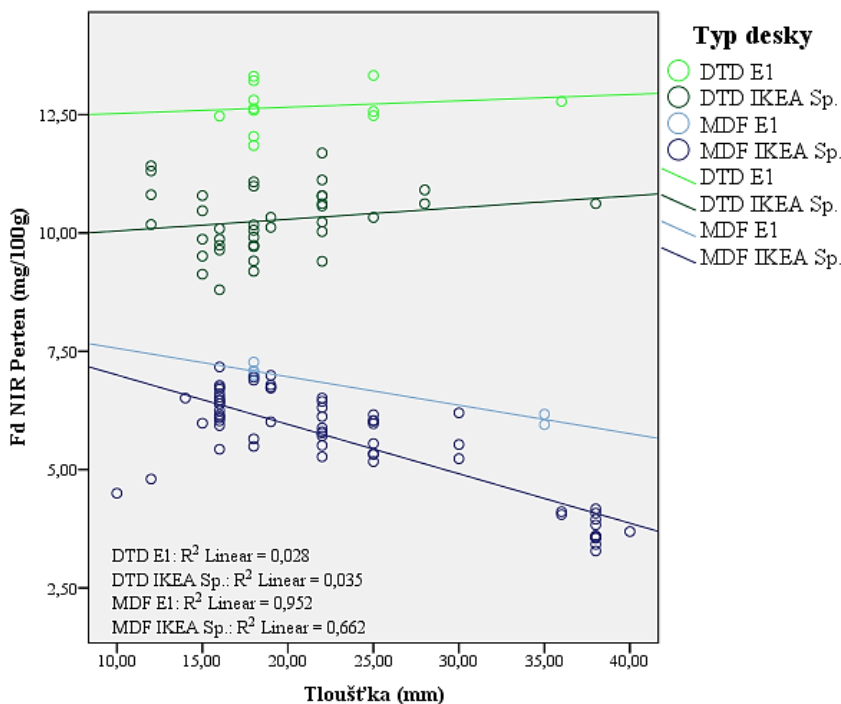
Tabulka č. 19: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR

ANOVA ^b						
Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	147,275	1	147,275	22,537	,000 ^a
	Residual	777,658	119	6,535		
	Total	924,933	120			

a. Predictors: (Constant), tloušťka

b. Dependent Variable: NIR Perten Fd

Graf č. 10 zobrazuje rozdělení celého souboru dle jednotlivých typů desek a emisních tříd. Je možné usuzovat, že lineární závislost nemusí být platná u všech skupin desek.



Graf č. 10: Zobrazení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným metodou NIR spektrometrie dle jednotlivých typů desek a emisních tříd

V dalších analýzách byl hodnocen vliv tloušťek na obsah Fd u jednotlivých typů desek.

Tabulka č. 20: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR pro typ desky DTD E1

ANOVA^{b,c}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,065	1	,065	,286	,605 ^a
	Residual	2,278	10	,228		
	Total	2,343	11			

- a. Predictors: (Constant), tloušťka
- b. Dependent Variable: NIR Perten Fd
- c. Selecting only cases for which Typ desky = DTD E1

Tabulka č. 21: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR pro typ desky DTD IKEA Sp.

ANOVA^{b,c}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,591	1	,591	1,304	,261 ^a
	Residual	16,331	36	,454		
	Total	16,922	37			

- a. Predictors: (Constant), tloušťka
- b. Dependent Variable: NIR Perten Fd
- c. Selecting only cases for which Typ desky = DTD IKEA Sp.

Tabulka č. 22: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR pro typ desky MDF E1

ANOVA^{b,c}

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1,492	1	1,492	99,105	,000 ^a
	Residual	,075	5	,015		
	Total	1,567	6			

- a. Predictors: (Constant), tloušťka
- b. Dependent Variable: NIR Perten Fd
- c. Selecting only cases for which Typ desky = MDF E1

Tabulka č. 23: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou a obsahem Fd naměřeným pomocí NIR pro typ desky MDF IKEA Sp.

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	49,149	1	49,149	121,670	,000 ^a
	Residual	25,045	62	,404		
	Total	74,195	63			

a. Predictors: (Constant), tloušťka

b. Dependent Variable: NIR Perten Fd

c. Selecting only cases for which Typ desky = MDF IKEA Sp.

U DTD E1 a DTD IKEA Sp. nebyla prokázána lineární závislost, proto nebude tloušťka v modelu zohledněna. U MDF E1 a MDF IKEA Sp. byla lineární závislostí prokázána a s cílem zjednodušení požadavků na nastavení přístroje, bylo dále hledáno jedno nastavení pro skupinu MDF.

V dalším kroku byla provedena analýza lineární závislosti mezi perforátorovou metodou a NIR spektrometrií s přihlédnutím k vlivu tloušťky desky pro skupinu MDF E1 a MDF IKEA Sp.

Tabulka č. 24: Vyhodnocení lineární závislosti mezi tloušťkou, obsahem Fd naměřeným pomocí NIR a obsahem Fd naměřeným DDL pro typ desky MDF

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-,124	,938		-,133	,895
	PertenEN120edge	,633	,112	,865	5,631	,000
	tloušťka	,042	,015	,436	2,836	,006

a. Dependent Variable: DDL Fd

b. Selecting only cases for which Typ desky: MDF E1, MDF IKEA Sp.

Pro nastavení přístroje je v případě MDF E1 a MDF IKEA Sp. nutné zohlednit tloušťky desek.

$$\mathbf{NIR\ Fd2 = 0,633 * NIR\ Fd + 0,042 * tloušťka\ desky - 0,124}$$

NIR Fd *naměřená hodnota obsahu Fd pomocí NIR spektrometru*

NIR Fd2 *hodnota Fd (NIR) po upravení nastavení přístroje*

Bylo zjištěno, že nelze použít jedno nastavení přístroje pro oba typy desek. V případě DTD byla nalezena lineární závislost mezi naměřeným obsahem Fd perforátorovou metodou a metodou NIR spektrometrie. Lze tedy nastavení přístroje upravit na základě vzorce viz kapitola 5.2.2.2. Pro typ desky MDF nebyla nalezena stejná lineární závislost jako v případě DTD, byl zohledněn další faktor – tloušťka. Výsledná lineární závislost je statisticky významná a je doporučeno upravit nastavení přístroje na základě vzorce, viz kapitola 5.2.2.3., který zohledňuje též vliv tloušťky.

V rámci získání širšího náhledu na danou problematiku byl proveden průzkum publikovaných zdrojů zabývajících se stanovením obsahu Fd v dřevotřískových a dřevovláknitých deskách pomocí NIR spektrometrie. Přestože byly prostudovány výzkumné práce odkazující se alespoň okrajově na danou tematiku, konfrontace s výsledky jiných autorů nebyla provedena, poněvadž v rozsahu diplomové práce nebyly objeveny dostupné zdroje, které by se této konkrétní problematice věnovaly.

Via et al. (2014) specifikuje oblasti zkoumání a analýzy dřeva, pro něž má NIR spektrometrie význam a v nichž je uplatněna; je užívána k predikci obsahu ligninu, celulózy, hemicelulózy, extraktiv, krystalické části celulózy a kvality ligninu. Odvozenými charakteristikami, souvisejícími s chemickou stavbou dřeva, které jsou zkoumány pomocí NIR spektrometrie, jsou pak úhel sklonu mikrofibril, morfologie tracheid, mechanické vlastnosti, výtěž dřevní dužiny, hustota, bobtnání, vlhkost, poměr jádrového a bělového dřeva a tlakové dřevo.

Americký patent (Dessipri et al., 2003) proklamuje, že je možné stanovit celkový obsah močoviny a Fd v močovinoformaldehydovém koncentrátu, který je směsí přibližně 15 látek, a zároveň monitorovat reakci mezi močovinou a Fd v produkci UF lepidel. O jejich detekci v materiálech na bázi dřeva však nepojednává.

Rials et al. (2002) zkoumali pomocí metody NIR mechanicko-fyzikální vlastnosti MDF a hledali závislosti mezi typem použitých lepidel a mechanicko-fyzikálními vlastnostmi desek. V tomto případě se jednalo o tři typy MDF se třemi aplikovanými druhy lepidel: MUF, UF a UF s příměsí vosku. Byl prokázán vliv typu lepidla na soudržnost desky, předmětem této studie však nebylo stanovení množství jednotlivých složek v těchto lepidlech.

Předmětem výzkumu Henriques et al. (2012) bylo stanovení obsahu melaminu v MUF lepidlech. Metoda založená na NIR podala lepší výsledky než spektrometrická referenční metoda, nehovoří se zde však o Fd.

Na základě provedených analýz UF lepidla v DTD tvrdí Riegler et al. (2012), že metoda NIR spektrometrie má vysoký potenciál pro uplatnění ve sledování obsahu UF lepidla v dřevotřískových deskách, doplňuje však, že by bylo vhodné zvýšit počet měření a zároveň použít rozemleté vzorky DTD. Tím jsou přednosti této metody - rychlost a jednoduchost - významně degradovány.

Burns, Ciurczak (2008) uvádí, že pro měření obsahu formaldehydu v UF lepidlech byla za účelem analýzy polymerů vyvinuta FT-NIR metoda. Nehovoří ovšem o analýze obsahu Fd v deskách, v nichž byla tato lepidla použita.

Profesor Rupert Wimmer pak ve svém e-mailu z 29. 2. 2016 píše: „Prováděli jsme experimenty s NIR a formaldehydem, ale nefungovalo to, nenacházeli jsme korelaci, a tak jsme vyvinuli novou metodu pro detekci formaldehydu „ion mobility spectroscopy“, kterou jsme si nechali patentovat“ (Wimmer, 2016).

6. ZÁVĚR

Spektroskopická metoda založená na interakci blízkého infračerveného záření se zkoumanou látkou, Near-infrared spectroscopy (NIR) je potenciálně použitelnou variantou pro kontrolu kvality, pro určení charakteristických vlastností dřevotřískových a dřevovláknitých desek. Velkou výhodou této metody je bezesporu rychlost analýzy vzorků v porovnání s perforátorovou metodou, která je doposud v provozech široce uplatňována pro kontrolní zkoušky obsahu Fd v aglomerovaných materiálech, avšak která je také často zpochybňována v důsledku vysoké spotřeby zdraví škodlivého toluenu.

Míka et al. (2008) tvrdí, že NIR spektrometrie je metodou sekundární a nelze tudíž očekávat, že její přesnost bude vyšší než přesnost standardní (v našem případě perforátorové metody), na jejíž přesnost je NIR testována.

V případě měření přístrojem Perten DA 7250 realizovaném v DDL bylo toto tvrzení prokázáno.

Z provedeného pozorování kompletního souboru je pak patrné, že všechny vzorky nedávají na jednom nastavení kalibrační křivky dobré výsledky a nelze tudíž tvrdit, že by hodnoty naměřené NIR spektrometrem byly z hlediska aplikovatelnosti pro provozní měření obsahu Fd v dřevotřískových deskách a dřevovláknitých deskách se střední hustotou uspokojivé. Tento fakt je pravděpodobně dán stávajícím „Perten“ továrním nastavením přístroje, kde je kalibrace pro měření obsahu Fd v materiálech na bázi dřeva založena na analýze více než 100 vzorků, avšak z nekonkrétně definované skupiny „Wood Panels“.

Po rozdělení na skupinu DTD a MDF je výsledek výrazně lepší, zejména pak pro dřevotřískové desky, jejichž naměřené hodnoty obsahu formaldehydu NIR spektrometrem sice nekorespondují s hodnotami naměřenými perforátorovou metodou, ale je patrná významná závislost mezi oběma aplikovanými metodami.

Navrhují tedy, aby dřevotřískové desky byly v budoucnu testovány samostatně jako specifická skupina s vlastním nastavením parametrů kalibrace.

U skupiny MDF by bylo vhodné zohlednit při nastavení tloušťku desky.

Po konzultaci se zástupcem společnosti Perten pro Českou republiku Ing. René Bienem bylo zhodnoceno, že kalibrace přístroje pro měření desek Lukapol a Luhopol nebude změněna, bude však nutné provést výše uvedené rozdělení na dvě

skupiny dle typů desek. Každá skupina bude zastupovat samostatný „projekt“, pro nějž bude upraveno nastavení a to korekcí parametrů kalibrace BIAS a Slope.

Přestože měření vlhkosti nebylo předmětem této práce, ačkoli v rámci stanovení obsahu Fd v deskách bylo nutné její přítomnost zohlednit, bylo prokázáno, že metoda NIR spektrometrie je aplikovatelná pro zjišťování vlhkosti v deskách bez nutných výrazných úprav nastavení přístroje. Toto zjištění dokazuje proklamovanou dobrou absorpci vibrací O-H vazeb v NIR spektru.

Měření obsahu Fd v dřevotřískových a dřevovláknitých deskách přístrojem Perten DA 7250 technikou difuzní reflektance bylo první svého charakteru realizované na území České republiky.

Na základě dosavadních zjištění doporučuji realizovat navazující měření většího souboru vzorků v průběhu delšího časového období, aby bylo možné prokázat vhodnost přístroje Perten DA 7250, respektive NIR spektrometrie, pro měření kvality dřevotřískových a dřevovláknitých desek, která je charakterizována především množstvím volného Fd. Pro podrobnější výsledky doporučuji provést analýzu na základě většího počtu porovnávaných vzorků a zohlednit další faktory, např. emisní třídu, vlhkost a další.

Přístroj Perten DA 7250 byl na počátku roku 2016 instalován na Fakultě lesnické a dřevařské ČZU v Praze. Navazující měření a hlubší průnik do problematiky NIR spektrometrie, její využití v dřevařském sektoru pro analýzu obsahu a úniku Fd a pro další progresivní analýzy by byly vhodným předmětem rozsáhlejšího zkoumání.

SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

- ČSN EN 322. *Zisťovanie vlhkosti*. Praha: Český normalizační institut, 1994a. 8 s.
- ČSN EN 120 *Dřevní materiály - Zjišťování obsahu formaldehydu: Extrakční postup zvaný "perforátorová metoda"*. Praha: Český normalizační institut, 1994b. 16 s.
- ČSN EN 312. *Třískové desky - Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2004. 16 s.
- ČSN EN 309. *Třískové desky - Definice a klasifikace*. Praha: Český normalizační institut, 2005. 8 s.
- ADAMOVIČ, Tereza. *Závěrečná zpráva z odborné praxe DDL Lukavec*. Praha: ČZU, 2014.
- BARTUŠEK, Miloš; PAZOUREK, Jiří. *Základy metod analytické chemie* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2013 [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/~analchem/files/pdf/bartusek_skripta.pdf>.
- BERÁNKOVÁ, Jitka. *Materiály na bázi dřeva. proLignum: Prohlubovací kurs v oboru dřevostaveb* [online]. © 2010 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <<http://www.prolignum.cz/fileadmin/prolignum/media.cz/Holzbaukurs/Kapitel2-JB.pdf>>.
- BISKUP, Roman. *Statistika: Regresní a korelační analýza – Úvod do problému*. [online]. © 2008 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <<http://home.ef.jcu.cz/~birom/stat/prednasky/17.pdf>>.
- BÖHM, Martin. *Technologie výroby aglomerovaných materiálů* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2005 [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://fld.czu.cz/~bohml/aglomerovane_materialy.pdf>.
- BÖHM, Martin. *Vliv vlhkosti na mechanicko-fyzikální vlastnosti OSB*. Česká zemědělská univerzita. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra zpracování dřeva, 2008. 105 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. František Friess CSc.
- BÖHM, Martin; REISNER, Jan; BOMBA, Jan. *Materiály na bázi dřeva*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2012. 183 s. ISBN 978-80-213-2251-6.
- BURNS, Donald; CIURCZAK, Emil. *Handbook of Near-Infrared Analysis*. 3.vyd. Boca Raton: CRC Press, 2008. 834s. ISBN 978-0-8493-7393-0.
- BUYUKSARI, Umit et al. Evaluation of the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard manufactured from waste stone pine (*Pinus pinea* L.) cones. *Bioresource technology*, 2010, vol. 101, issue 1, s. 255-259. ISSN 0960-8524.

- CARVALHO, Luis; MAGALHÃES, Fernão; FERRA, João. Formaldehyde emissions from wood-based panels: Testing methods and industrial perspectives. In *Formaldehyde: Chemistry, Applications and Role In Polymerization*. Hauppauge: Nova Science Publishers, 2012. Kapitola 2, s. 73-108.
- ČÍŽEK, Jan. *Vlastnosti a zpracování třískových a vláknitých desek*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985. 351 s. . ISBN 04-840-85.
- DAVID, Stanislav; KRATOCHVÍL, Karel. *Materiály pro 2. ročník SPŠ dřevařských*. 2. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986. 142 s. ISBN 04-803-86.
- DDL, Dřevozpracující družstvo Lukavec. *Pracovní postup C 1.17: Stanovení obsahu Fd ČSN EN 120 - Desky DTD Lukapol a MDF Luhopol*. Lukavec: DDL, 2004.
- DDL, Dřevozpracující družstvo Lukavec. *Dřevotřískové desky (Lukapol)*. [online]. © 2005a [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <<http://www.ddl.cz/produkty-a-sluzby/drevotriskovye-desky-lukapol.html>>.
- DDL, Dřevozpracující družstvo Lukavec. *Dřevovláknité desky MDF (LUHOPOL)*. [online]. © 2005b [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <<http://www.ddl.cz/produkty-a-sluzby/drevovlaknite-desky-mdf-luhopol.html>>.
- Enigma N.V. *Use of NIR (Near-Infrared Spectroscopy) in composite production*. DESSIPRI, Eugenia et al. IPC C08G 8/10. Spojené státy americké. 6,639,044 B2.2003-10-28.
- DUNKY, Manfred. Vývoj obsahu formaldehydu v průmyslově vyráběných dřevotřískových deskách. In *Materiály na bázi dřeva*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2012. s. 47.
- EISNER, Karel; HAVLÍČEK, Vladimír; OSTEN, Miloš. *Dřevo a plasty*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1983. 384 s. ISBN 04-805-83.
- FAOSTAT, Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Browse Data*. [online]. © 2015 [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://faostat3.fao.org/browse/F/*/E>.
- FRIHART, Charles et al. Formaldehyde emissions from urea-formaldehyde- and no-added-formaldehyde- bonded particleboard as influenced by temperature and relative humidity. *Forest Products Journal*, 2012, vol. 62, issue 7-8, s. 551-558. ISSN 0015-7473
- GREENCHEM. *Co je to močovina?* [online]. © 2016 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <<http://www.greenchem-adblue.cz/?1200/co-je-to-mocovina>>.

- HENRIQUES, Ana et al. Determination of formaldehyde/urea molar ratio in amino resins by near-infrared spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 124, 3, 2441-2448. 1097-4628.
- HEŘMÁNEK, Ladislav. *Výrobní technologie DTD*. Výklad v rámci odborné praxe v: Dřevozpracující družstvo Lukavec, 2014.
- HOFMAN, Jaroslav; URBANOVÁ, Marie. *Fyzika I*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2011. 259 s. ISBN 978-80-7080-777-4.
- HOLČAPEK, Michal *Rotačně-vibrační spektrometrie, infračervená spektrometrie (IR)*. [online]. © 2016 [cit. Dostupné z: <http://holcapek.upce.cz/teaching/Mol_spek/Mol_spek_prednaska2_IC_Raman.pdf>.
- IARC, International Agency for Research on Cancer. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: List of Classifications*. [online]. © 2016 [cit. 2016-01-13]. Dostupné z: <<http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/>>.
- IKEA. *IOS-MAT-0003: Specification Formaldehyde requirements of wood-based materials and products*. Älmhult: IKEA, 2009. 39 s.
- JÍLEK, David. *Výrobní technologie MDF*. Výklad v rámci odborné praxe v: Dřevozpracující družstvo Lukavec, 2014.
- KANIA, Patrik. *Infračervená spektrometrie* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2016 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <<https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infra%C4%8Derven%C3%A1+spektrometrie.pdf>>.
- KARLBERG, Bo *Principles of NIR a mid-IR Spectroscopy*. [online]. © 2006 [cit. 2015-11-03]. Dostupné z: <<http://lipas.uwasa.fi/~TAU/AUTO3220/Umea2handouts.pdf>>.
- KOPLÍK, Richard. *Infračervená spektrometrie* [online]. © 2015 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <<http://web.vscht.cz/~koplikr/ČástA4.pdf>>.
- KOWALUK, Grzegorz. Machining of Wood and Wood Composites. In *Wood machining*. 1. vyd. Hoboken: ISTE, 2011. Kapitola 1, s. 1-25.
- LITEPLO, Robert et al. *Concise International Chemical Assessment Document 40: Formaldehyde*. Geneva: World Health Organization, 2002. 75 s. ISBN 92-4-153040-5.
- MATĚJKA, Pavel. *Spektroskopie základní pojmy*. [online]. © 2010 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <<http://old.vscht.cz/anl/matejka/Chemie13-spektroskopie-zaklad.pdf>>.

- MÍKA, Václav; KOHOUTEK, Alois; NERUŠIL, Pavel. *Spektroskopie v blízké infračervené oblasti (NIR): Výběr praktických aplikací v zemědělství*. Praha: Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., 2008. 48 s. ISBN 978-80-87011-53-9.
- MUZIKÁŘ, Zdeněk et al. *Materiály II pro UO Truhlář*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 2008. 175 s. ISBN 978-80-7333-061-3.
- Technická směrnice č. 12-2015: Aglomerované materiály na bázi dřeva a výrobky z nich. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2015.
- NAGY, Vojtěch. Vlákenné desky. In *Dřevařská příručka 2. část*. 1. vyd. . Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. Kapitola 21, s. 607-628.
- NĚMEC, Ivan. *Základy spektroskopie 3*. [online]. © 2013 [cit. Dostupné z: <<http://web.natur.cuni.cz/~agnemec/Prednasky%20Zaklady%20spektroskopie/Z%20Zaklady%20spektroskopie%203.pdf>>.
- NIS, Nábytkářský informační server. *Informace o výrobě*. [online]. © 2013 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <<http://www.n-i-s.cz/cz/informace-o-vyrobe/page/65/>>.
- NOVOTNÁ, Radka; ŠILHA, Tomáš; TRÁVNÍČEK, Zdeněk. *Spektrální metody studia chemických látek* [online]. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého, 2016 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <http://agch.upol.cz/userfiles/file/pdf/Spektralni_metody.pdf>.
- NOVOTNÝ, Milan. Výroba třískových desek. In *Dřevařská příručka 2*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. Kapitola 20, s. 579 - 605.
- PERTEN. *DA 7250 Quick Guide: Analyzing particleboard and MDF strand samples for formaldehyde content by predict perforator value*. 2014. 6 s.
- PERTEN. *Calibration Package: Woodbased Panels*. Hagersten: Perten 2015. 2 s.
- PERTEN. *DA-7250-NIR-analyzer: Specifications*. [online]. © 2016 [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <<http://www.perten.com/Products/DA-7250-NIR-analyzer/Specifications/>>.
- RIALS, Timothy; KELLEY, Stephen; SO, Chi-Leung. Use of advanced spectroscopic techniques for predicting the mechanical properties of wood composites. *Wood and Fiber Science*, 2002, vol. 34, issue 3, s. 398-407.
- RIEGLER, Martin et al. Detection of UF resin on wood particles and in particleboards: potential of selected methods for practice-oriented offline detection. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2012, vol. 70, issue 6, s. 829-837. ISSN 1436-736X.
- RISHOLM-SUNDMAN, Maria et al. Formaldehyde emission-Comparison of different standard methods. *Atmospheric Environment*, 2007, vol. 41, issue 15, s. 3193-3202. ISSN 1352-2310.

- SALEM, Mohamed et al. Formaldehyde emission from wood-based panels bonded with different formaldehyde-based resins. *Drvna Industrija*, 2011, vol. 62, issue 3, s. 177-183. ISSN 0012-6772.
- SČS, Sdružení českých spotřebitelů. *Kabinet pro standardizaci: Referenční metody*. [online]. © 2015 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <<http://www.top-normy.cz/users/files/platformy/metrologie/Referencni-metody.pdf>>.
- SIESLER, Heinz et al. *Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. 361 s. ISBN 3-527-30149-6.
- VIA, Brian et al. Near infrared spectroscopy calibration for wood chemistry: Which chemometric technique is best for prediction and interpretation? *Sensors (Switzerland)*, 2014, vol. 14, issue 8, s. 13532-13547. ISSN 1424-8220.
- VRBA, Vladimír; HULEŠ, Ludvík. Humus - půda - rostlina (2): Humus a půda. *Biom.cz* [online]. 2006, [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/humus-puda-rostlina-2-humus-a-puda>>.
- VVÚD, Výzkumný a vývojový ústav dřevařský. *Zpracovatelé dřeva a výrobci*. [online]. © 2016 [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <<http://www.vvud.cz/zpracovatele-dreva-vyrobci/>>.
- WIMMER, Rupert. *Part 4: UV-VIS-NIR in the wood industry*. [elektronická prezentace]. Přednáška z předmětu Wood-Industrial Processing: Wood- and Fibre-based Material. 2015. [cit. 2015-11-16].
- WIMMER, Rupert. *NIR for formaldehyde content* [online]. 29. února 2016 11:42; [cit. 2016-03-01]. Osobní komunikace.
- WORKMAN, Jerry; WEYER, Lois. *Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy*. 1.vyd. Boca Raton: CRC Press, 2008. 344 s. ISBN 978-1-57444-784-2.
- YU, Chuck; CRUMP, Derrick. Testing for Formaldehyde Emission from Wood-Based Products - A Review. *Indoor Built Environment*, 1999, vol. 8, issue 5, s. 280–286. ISSN 1420-326X.
- ZUNTYCH, Zdeněk. *Dřevo pro život*. Lukavec: Dřevozpracující družstvo, 2003. 96 s.
- ŽÁK, Jaroslav. *Materiály pro 1.ročník SOU oborů zpracování dřeva a výrobu hudebních nástrojů*. 5. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988. 136 s. ISBN 04-508-88.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Základní charakteristiky zkušebního materiálu.....	75
Příloha č. 2: Nářezový plán odběru vzorků pro kompletní zkoušku.....	76
Příloha č. 3: Nářezový plán odběru vzorků pro kompletní zkoušku MDF.....	77
Příloha č. 4: CARB atest pro DTD vystavený VVÚD v Praze.....	78
Příloha č. 5: CARB atest pro MDF vystavený VVÚD v Praze	79
Příloha č. 6: Technické parametry přístroje Perten DA 7250.....	80
Příloha č. 7: Výňatek z databáze naměřených hodnot obsahu Fd a vlhkosti DTD a MDF vygenerované přístrojem Perten DA 7250	81
Příloha č. 8: Certifikáty naměřených hodnot vzorku MDF (M69) a DTD (P70)	82
Příloha č. 9: Vybrané druhy vibračních molekul vyvolané IR zářením	83
Příloha č. 10: Naměřené hodnoty DTD přístrojem Perten DA 7250 a perforátorovou metodou dle ČSN EN 120.....	84
Příloha č. 11: Naměřené hodnoty MDF přístrojem Perten DA 7250 a perforátorovou . metodou dle ČSN EN 120.....	86

PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Základní charakteristiky zkušebního materiálu

Zdroj: DDL 2005a, 2005b

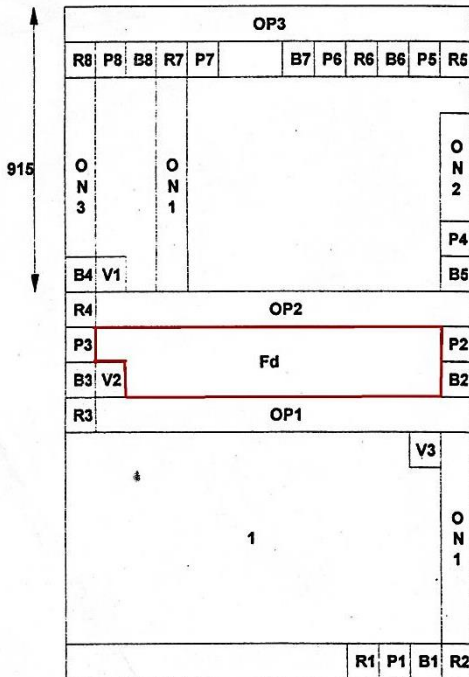
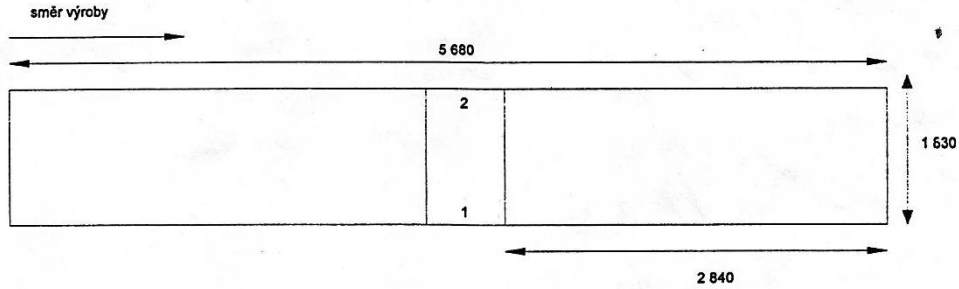
Dřevotřískové desky – DTD Lukapol	
Základní formát: 2840 x 1830 mm	
Tloušťka	Přibližná hustota
mm	kg/m ³
8	740
10	716
12	714
16	668
18	673
19	656
22	653
25	673
28	636
30	603
32	610
36	596
38	596

Dřevovláknité desky – MDF Luhopol	
Základní formát: 2.750 x 1.840 mm	
Tloušťka	Přibližná hustota
mm	kg/m ³
8	820
10	790
12	780
16	770
18	770
19	770
22	750
25	750
28	730
30	730
32	710
36	680
38	670
40	670

Příloha č. 2: Nářezový plán odběru vzorků pro kompletní zkoušku

Zdroj: DDL, 2004

NÁŘEZOVÝ PLÁN ODBĚRU VZORKŮ - LINKA DTL
KOMPLETNÍ ZKOUŠKA DESKY - ČSN EN 326 - 1



Legenda k nářezovému plánu:
Mez pevnosti v ohybu, modul pružnosti
 ČSN EN 310
 označení: OP1, OP2, OP3
 ON1, ON2, ON3

Pevnost v tahu kolmo na rovinu desky
 ČSN EN 319
 označení: R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8

Hustota desky
 ČSN EN 323
 označení: R1, R2, R3, R4, R5, R6

Pevnost v tahu kolmo na povrchovou vrstvu desky
 ČSN EN 311
 označení: P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8

Bobtnání
 ČSN EN 317
 označení: B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8
 LICHÁ - LÍC, SUDÁ - RUB
 VZORKY MĚRIT JEDNOTLIVĚ

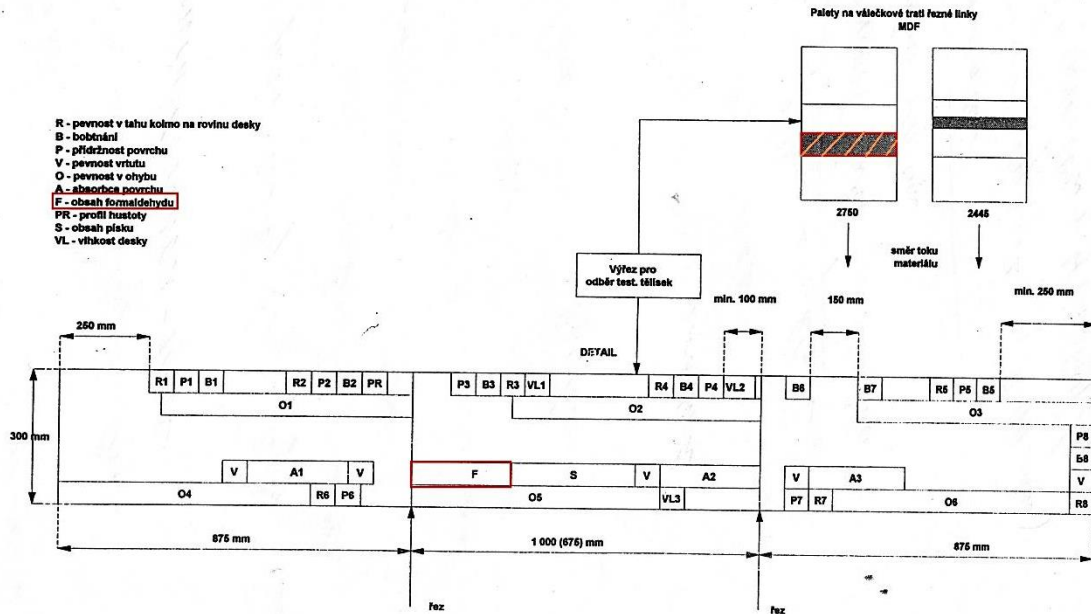
Vlhkost desek
 ČSN EN 322
 označení: V1, V2, V3

Obsah formaldehydu
 ČSN EN 120
 označení: Fd

Příloha č. 3: Nářezový plán odběru vzorků pro kompletní zkoušku MDF


Zdroj: DDL, 2004

Nářezový plán odběru vzorků pro kompletní zkoušku MDF desky



Příloha č. 4: CARB atest pro DTD vystavený VVÚD v Praze

Zdroj: DDL, 2015


Dřevořský ústav
Timber Institute

Timber Research and Development Institute Praha
Na Florenci 7-9, 111 71 Praha 1
Third Party Certifier No.23

CARB Attestation

In order of the State of California Air Resource Board (CARB) with reference to the executive order W-15-023

Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, Praha, s. p. (VVÚD)
(Timber Research and Development Institute Praha)
Na Florenci 7-9, 111 71 Praha 1
Czech Republic

was approved as ARB third party certifier to certify uncoated wood based products according to the Final Regulation Order of "Airborne Toxic Control Measure to Reduce Formaldehyde Emission from Composite Wood Products", 93120-93120.12, title 17, California Code of Regulations, § 93120.

VVÚD, s. p. Praha has verified the accuracy of the emission test procedures and facilities used by the composite wood product manufacturer to conduct formaldehyde emission tests.

To monitor manufacturer quality assurance programs. Assessed that below mentioned product fulfils the emission requirements according to table 1 of § 93120.2 of **Phase 2** (including Phase 1). Providing independent audits and inspections as an ARB approved third party certifier according supervision contract no. 60 002671 15 four times a year at:

Dřevozpracující družstvo
Lukavec 9
394 26
Czech Republic


product:

PARTICLEBOARD E-LE – thickness range 8 mm – 38 mm

This attestation has been issued based on:


Test report MVZ – N – 02/15/012
and confirms the validity of Supervision report No. IKEA – 2672/15/1

effective until 20th of June 2015, subject to the positive evaluation of the audit in the following quarter, and is in force as long as the continuous supervision is carried out by TPC No. 23, unless the conditions under which this certificate has been issued will have changed considerably, and latest on 20th of March 2016.


Dřevořský ústav
Timber Institute


J. Beránková
Ing. Jitka Beránková, Ph.D.
Head of Third Party Certifier No. 23

In Prague, 20th of March 2015


TIMBER RESEARCH AND DEVELOPMENT INSTITUTE PRAHA
Dřevořský ústav
Timber Institute
TPC-23

Příloha č. 5: CARB atest pro MDF vystavený VVÚD v Praze

Zdroj: DDL, 2015


Dřevařský ústav
Timber Institute

Timber Research and Development Institute Praha
Na Florenci 7-9, 111 71 Praha 1
Third Party Certifier No.23

CARB Attestation

In order of the State of California Air Resource Board (CARB) with reference to the executive order W-15-023

Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, Praha, s. p. (VVÚD)
(Timber Research and Development Institute Praha)
Na Florenci 7-9, 111 71 Praha 1
Czech Republic

was approved as ARB third party certifier to certify uncoated wood based products according to the Final Regulation Order of "Airborne Toxic Control Measure to Reduce Formaldehyde Emission from Composite Wood Products", 93120-93120.12, title 17, California Code of Regulations, § 93120.

VVÚD, s. p. Praha has verified the accuracy of the emission test procedures and facilities used by the composite wood product manufacturer to conduct formaldehyde emission tests.

To monitor manufacturer quality assurance programs. Assessed that below mentioned product fulfils the emission requirements according to table 1 of § 93120.2 of **Phase 2** (including Phase 1). Providing independent audits and inspections as an ARB approved third party certifier according supervision contract no. 60 002671 15 four times a year at:

Dřevozpracující družstvo
Lukavec 9
394 26
Czech Republic


product:

MDF E-LE – thickness range 8 mm – 45 mm

This attestation has been issued based on:


Test report MVZ – N – 02/15/011
and confirms the validity of Supervision report No. IKEA – 2671/15/1

effective until 20th of June 2015, subject to the positive evaluation of the audit in the following quarter, and is in force as long as the continuous supervision is carried out by TPC No. 23, unless the conditions under which this certificate has been issued will have changed considerably, and latest on 20th of March 2016.


Dřevařský ústav
Timber Institute

Ing. Jitka Beránková
Ing. Jitka Beránková, Ph.D.
Head of Third Party Certifier No. 23

In Prague, 20th of March 2015


TIMBER RESEARCH AND DEVELOPMENT INSTITUTE PRAGUE
Dřevařský ústav
Timber Institute
TPC-23

Příloha č. 6: Technické parametry přístroje Perten DA 7250

Zdroj: Perten, 2016



Analysis with Value

DA 7250 NIR – Specifikace

Obecné informace

Napětí V, Hz:	115/230 V, 50/60 Hz
Rozměry (VxŠxH):	517x370x390 mm se vzpřímeným dotykovým displejem
Hmotnost:	20 kg
Teplota prostředí:	5-40°C
Ochrana proti vlivům:	IP65, kompletní ochrana proti prachu a vodě
Typ nerezové oceli:	EN 1.4301 / AISI 304)

Analýza

Čas analýzy:	6 s
Velikost vzorků:	od několika zrněk po 380 ml
Typ vzorku:	zrno, potraviny, tekutiny, pasty a ostatní produkty
Parametry:	vlhkost, bílkoviny, olej, škrob, vlákno a další
Umístění vzorku:	bez kontaktu, snímání vzorku shora, rotující kelímek
Měřená oblast:	oblast standardního kelímku 108 cm ²
Regresní možnosti:	PLS (Partial Least Squares), ANN (Artificial Neural Networks), HR (Honnigs Regression), Classification
Chemometrický sw:	Unscrambler 9.8 (Camo), Unscrambler 10.3 (Camo), GRAMS 8.0 (Thermo Galactic)

Spektrometr a optické zařízení

Typ spektrometru:	Diode Array detector
Zdroj záření:	Žárovka bílého světla - fotodioda
Rozpětí vlnových délek:	950-1650 nm
Přesnost vlnových délek:	vyšší než 0.05 nm
Detektor:	Thermoelectricky chlazený 256 element InGaAs
Počet skenování:	~15 spectra / s
Životnost lampy:	minimálně dva roky

Uživatelské prostředí, sdílení dat

Uživatelské rozhraní:	12" barevný dotykový displej
Zobrazování výsledků:	velké znaky na obrazovce, tisk
Vnitřní paměť:	80GB Solid State Drive, SQL database
Sdílení:	USB (4) a vestavěné ethernet porty; Wifi, RS-232 a ostatní způsoby na principu USB

Příloha č. 7: Výňatek z databáze naměřených hodnot obsahu Fd a vlhkosti DTD
a MDF vygenerované přístrojem Perten DA 7250
Zdroj: Perten, 2015

Page 2 of 7

Wood panels (edge)	Moisture	Perforator -edge As is
5/5/2015 21:17:17 M105	6.4	6.39
5/5/2015 21:14:31 M106	5.8	6.03
5/5/2015 21:12:24 M107	6.1	6.72
5/5/2015 21:09:55 M109	5.9	5.32
5/5/2015 21:05:41 M108	6.1	5.51
5/5/2015 21:04:20 M110	5.9	5.43
5/5/2015 21:03:06 M111	5.4	4.8
5/5/2015 21:01:51 M112	5.5	7.06
5/5/2015 21:00:31 M113	6	6.6
5/5/2015 20:58:37 M115	5.1	5.98
5/5/2015 20:57:13 M114	5.8	6.39
5/5/2015 20:53:40 M117	6.2	5.95
5/5/2015 20:51:58 M118	7.1	4.05
5/5/2015 21:23:34 M120	7.2	3.28
5/5/2015 19:19:42 P102	5.7	10.79
5/5/2015 19:13:30 P101	5.7	9.87
5/5/2015 19:05:42 M100	6.7	5.97
5/5/2015 18:58:25 M99	6.7	5.55
5/5/2015 18:51:17 M98	7.5	3.42
5/5/2015 18:48:26 P86	6.9	9.87

Příloha č. 8: Certifikáty naměřených hodnot vzorku MDF (M69) a DTD (P70)
 emisní třídy E0,5 – CARB vygenerované přístrojem Perten DA7250
 Zdroj: Perten, 2015

Certificate of Analysis



Product	Wood panels (edge)
SampleID	M69
Date of analysis	4/17/2015 11:02:31

Parameter	Result	Target
Moisture	6.80	
Perforator -edge	3.95	

Certificate of Analysis



Product	Wood panels (edge)
SampleID	P70
Date of analysis	4/17/2015 11:07:08

Parameter	Result	Target
Moisture	5.00	
Perforator -edge	11.31	

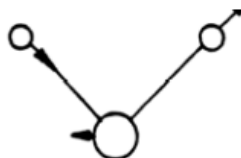
Příloha č. 9: Vybrané druhy vibrací molekul vyvolané IR zářením

Zdroj: Němec, 2013

Tříatomová molekula (např. CH₂)



Valenční symetrická
(stretching)



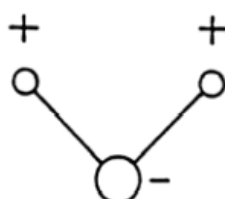
Valenční antisymetrická



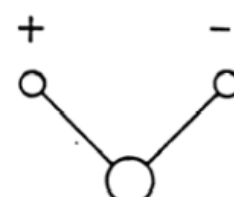
Deformační nůžková
(scissoring)



Deformační kyvadlová
(rocking)

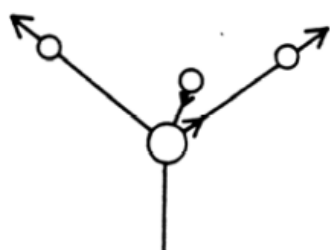


Deformační vějířová
(wagging)

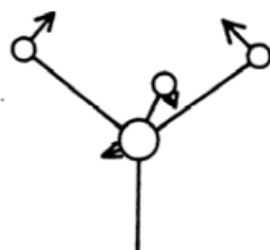


Deformační kroutivá
(twisting)

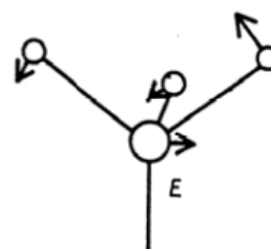
Čtyřatomová molekula (např. CH₃)



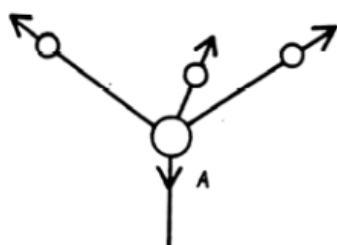
Valenční degenerovaná



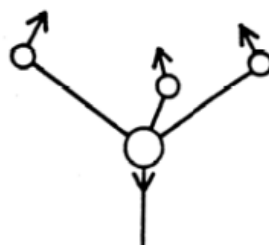
Deformační degenerovaná



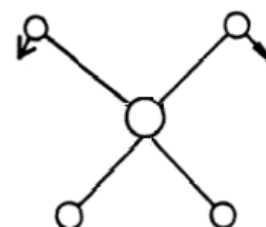
Deformační kyvadlová
(rocking)



Valenční symetrická



Deformační symetrická



Deformační kroutivá
(twisting)

Příloha č. 10: Naměřené hodnoty DTD přístrojem Perten DA 7250 a perforátorovou metodou dle ČSN EN 120

Zdroj: Adamová dle Perten, 2015 a DDL, 2015

Označení vzorku	Typ desky	Emisní třída	Tl.	NIR Perten vlhkost	NIR Perten Fd	DDL vlhkost	DDL Fd
/	/	/	(mm)	(%)	(mg/100g)	(%)	(mg/100g)
P1	DTD	E1	18	6,1	12,81	5,7	5,85
P2	DTD	E1	25	6,2	12,48	6,28	5
P3	DTD	IKEA Sp.	22	5,9	11,12	5,84	2,93
P4	DTD	IKEA Sp.	18	5,3	10,06	4,76	2,5
P5	DTD	IKEA Sp.	25	7	10,33	6,4	2,25
P6	DTD	IKEA Sp.	22	5,7	9,4	5,16	2,65
P7	DTD	IKEA Sp.	22	6,6	10,62	5,99	2,46
P8	DTD	E1	25	6,7	13,33	6	4,98
P9	DTD	IKEA Sp.	22	6,2	10,79	5,82	2,84
P10	DTD	E1	18	5,7	13,22	5,71	6,49
P12	DTD	E1	25	6,7	12,57	6,26	5,79
P13	DTD	IKEA Sp.	18	6	11,08	5,77	2,82
P14	DTD	IKEA Sp.	16	5,8	10,09	4,97	2,81
P15	DTD	E1	18	6,5	13,31	6,32	6,51
P17	DTD	IKEA Sp.	12	5,4	11,42	4,92	2,64
P18	DTD	IKEA Sp.	15	5,6	10,47	5,78	2,53
P19	DTD	E1	18	6,8	11,85	6,95	7,1
P20	DTD	IKEA Sp.	22	6,3	10,78	5,84	2,93
P21	DTD	IKEA Sp.	12	5,4	10,81	4,38	2,83
P22	DTD	IKEA Sp.	22	6,6	11,69	5,67	2,6
P23	DTD	IKEA Sp.	16	5,9	9,74	5,5	2,38
P24	DTD	E1	18	5,9	12,59	5,74	4,46
P25	DTD	IKEA Sp.	18	5,5	9,71	4,88	2,25
P26	DTD	IKEA Sp.	28	7,1	10,62	6,18	2,39
P27	DTD	IKEA Sp.	16	6	8,8	5,18	2,2
P29	DTD	IKEA Sp.	15	5,4	9,51	4,65	2,69
P30	DTD	IKEA Sp.	12	5,1	10,18	4,38	2,17
P70	DTD	IKEA Sp.	12	5	11,31	4,73	2,75
P75	DTD	IKEA Sp.	18	6	9,91	5,7	2,34
P76	DTD	IKEA Sp.	18	6,4	9,41	5,86	2,41
P81	DTD	IKEA Sp.	22	6,3	10,23	5,48	2,15
P82	DTD	IKEA Sp.	15	6,5	9,13	5,03	2,49
P83	DTD	IKEA Sp.	16	6,4	9,64	5,26	2,31
P84	DTD	IKEA Sp.	18	6,4	9,74	5,48	2,52

Označení vzorku	Typ desky	Emisní třída	Tl.	NIR Perten vlhkost	NIR Perten Fd	DDL vlhkost	DDL Fd
/	/	/	(mm)	(%)	(mg/100g)	(%)	(mg/100g)
P85	DTD	IKEA Sp.	18	6,5	9,19	5,44	2,63
P86	DTD	IKEA Sp.	16	6,9	9,87	5,14	2,67
P101	DTD	IKEA Sp.	15	5,7	9,87	4,86	1,89
P102	DTD	IKEA Sp.	15	5,7	10,79	4,89	1,97
P123	DTD	E1	18	6,4	12,04	5,45	6,22
P124	DTD	IKEA Sp.	22	6,5	10,03	5,51	2,33
P125	DTD	E1	18	6,8	12,63	6	4,99
P126	DTD	IKEA Sp.	18	5,7	10,17	4,75	2,62
P127	DTD	IKEA Sp.	18	6,3	10,99	5,36	2,37
P128	DTD	IKEA Sp.	28	6,8	10,91	6,25	3,08
P129	DTD	E1	16	6,6	12,47	6,08	6,35
P130	DTD	E1	36	7,8	12,78	8,65	6,17
P131	DTD	IKEA Sp.	38	7,3	10,62	7,45	2,72
P133	DTD	IKEA Sp.	19	6,3	10,33	5,36	2,48
P134	DTD	IKEA Sp.	19	6,5	10,12	5,16	2,46
P136	DTD	IKEA Sp.	22	6,9	10,57	5,59	2,45

Příloha č. 11: Naměřené hodnoty MDF přístrojem Perten DA 7250 a perforátorovou metodou dle ČSN EN 120

Zdroj: Adamová dle Perten, 2015 a DDL, 2015

Označení vzorku	Typ desky	Emisní třída	Tl.	NIR Perten vlhkost	NIR Perten Fd	DDL vlhkost	DDL Fd
/	/	/	(mm)	(%)	(mg/100g)	(%)	(mg/100g)
M31	MDF	IKEA Sp.	19	5,8	6,74	6,07	4,93
M32	MDF	IKEA Sp.	22	6,5	5,27	5,77	4,14
M33	MDF	IKEA Sp.	16	5,9	6,78	5,72	4,52
M34	MDF	IKEA Sp.	22	6,2	5,71	6,19	4,43
M35	MDF	IKEA Sp.	19	5,5	6,99	5,41	4,83
M36	MDF	IKEA Sp.	16	5,8	5,93	5,63	4,79
M37	MDF	IKEA Sp.	25	6,5	6,02	6,5	4,03
M38	MDF	IKEA Sp.	16	5,7	6,25	5,69	4,7
M39	MDF	IKEA Sp.	22	6,7	5,88	6,9	4,04
M40	MDF	IKEA Sp.	22	6,9	6,12	6,62	4,22
M41	MDF	E1	18	6,2	7,09	6,19	6,86
M42	MDF	IKEA Sp.	18	5,7	6,89	5,96	4,89
M43	MDF	IKEA Sp.	16	5,5	6,09	5,44	4,89
M45	MDF	IKEA Sp.	18	6	6,95	5,96	4,98
M46	MDF	E1	18	6,1	6,99	5,93	6,75
M47	MDF	IKEA Sp.	19	6,4	6,79	6,4	4,72
M48	MDF	IKEA Sp.	25	7	6,04	7,16	4,25
M49	MDF	IKEA Sp.	30	7	5,53	7,53	4,55
M50	MDF	IKEA Sp.	30	7,3	5,23	7,82	3,88
M51	MDF	IKEA Sp.	22	6,2	6,51	5,95	4,33
M52	MDF	IKEA Sp.	25	7,1	6,16	6,66	4,16
M53	MDF	IKEA Sp.	14	5	6,51	4,76	4,77
M54	MDF	IKEA Sp.	16	5,2	6,53	4,92	4,99
M55	MDF	IKEA Sp.	16	5,7	7,17	5,55	4,97
M56	MDF	IKEA Sp.	16	5,6	6,74	5,5	4,86
M57	MDF	IKEA Sp.	30	7,1	6,2	7,32	4,8
M58	MDF	IKEA Sp.	16	5,6	6,47	5,6	4,98
M60	MDF	IKEA Sp.	10	4,8	4,5	4,02	4,17
M61	MDF	IKEA Sp.	38	6,1	3,57	7,98	4
M63	MDF	IKEA Sp.	40	7,7	3,69	8,6	4,05
M65	MDF	IKEA Sp.	36	6,7	4,11	7,55	4,58
M66	MDF	IKEA Sp.	38	7,4	3,6	8,43	4,35
M67	MDF	IKEA Sp.	38	6,8	3,58	7,59	4
M68	MDF	IKEA Sp.	38	6,9	4,17	7,47	4,03

Označení vzorku	Typ desky	Emisní třída	Tl.	NIR Perten vlhkost	NIR Perten Fd	DDL vlhkost	DDL Fd
/	/	/	(mm)	(%)	(mg/100g)	(%)	(mg/100g)
M69	MDF	IKEA Sp.	38	6,8	3,95	7,57	4,14
M72	MDF	IKEA Sp.	16	6,5	6,7	5,88	4,99
M77	MDF	IKEA Sp.	22	6,9	6,44	7,13	3,1
M78	MDF	IKEA Sp.	22	6,6	6,31	7,27	3,05
M80	MDF	IKEA Sp.	22	6,8	5,8	6,45	3,91
M87	MDF	IKEA Sp.	22	6,5	5,77	5,91	4,13
M89	MDF	IKEA Sp.	16	6	6,16	5,47	4,29
M90	MDF	IKEA Sp.	16	5,9	6,46	6	4,89
M91	MDF	IKEA Sp.	19	6,1	6,01	5,64	4,09
M92	MDF	IKEA Sp.	25	6,7	5,34	7,12	3,75
M95	MDF	E1	35	6,3	6,17	7,61	6,94
M96	MDF	IKEA Sp.	25	6,8	5,17	7,83	3,87
M97	MDF	IKEA Sp.	38	7,5	4,08	8,2	3,66
M98	MDF	IKEA Sp.	38	7,5	3,42	7,93	2,81
M99	MDF	IKEA Sp.	25	6,7	5,55	6,26	4,02
M100	MDF	IKEA Sp.	25	6,7	5,97	6,59	4,47
M104	MDF	E1	18	6	7	6,01	6,1
M105	MDF	IKEA Sp.	16	6,4	6,39	5,82	4,58
M106	MDF	IKEA Sp.	16	5,8	6,03	5,55	4,23
M107	MDF	IKEA Sp.	19	6,1	6,72	6,1	4,35
M108	MDF	IKEA Sp.	22	6,1	5,51	5,85	4,29
M109	MDF	IKEA Sp.	25	5,9	5,32	5,69	4,46
M110	MDF	IKEA Sp.	16	5,9	5,43	5,77	4,36
M111	MDF	IKEA Sp.	12	5,4	4,8	4,73	4,2
M112	MDF	E1	18	5,5	7,06	5,32	5,65
M113	MDF	IKEA Sp.	16	6	6,6	5,75	4,26
M114	MDF	IKEA Sp.	16	5,8	6,39	5,2	4,17
M115	MDF	IKEA Sp.	15	5,1	5,98	4,69	4,57
M116	MDF	IKEA Sp.	16	5,7	6,12	5,42	4,22
M117	MDF	E1	35	6,2	5,95	6,47	6,25
M118	MDF	IKEA Sp.	36	7,1	4,05	7,26	4,11
M119	MDF	IKEA Sp.	38	7,7	3,83	8,56	3,84
M120	MDF	IKEA Sp.	38	7,2	3,28	7,22	3,7
M121	MDF	IKEA Sp.	38	7,2	3,55	7,43	4,02
M135	MDF	E1	18	6,5	7,27	5,85	6,16
M137	MDF	IKEA Sp.	18	5,7	5,49	5,55	3,33
M139	MDF	IKEA Sp.	18	5,7	5,65	5,35	3,3