

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra fyziky



Bakalářská práce

**Dielektrické vlastnosti dřevní štěpky – efekt vlhkosti a
objemové hmotnosti**

Tomáš Neuwirth

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Neuwirth

Inženýrství údržby

Název práce

Dielektrické vlastnosti dřevní štěpky – efekt vlhkosti a objemové hmotnosti

Název anglicky

Dielectric properties of wood chips – effect of moisture and bulk density

Cíle práce

Na základě literární rešerše navrhnout a provést měření dielektrických vlastností vzorků dřevní štěpky ve frekvenčním pásmu 10 kHz až 10 MHz. Zhodnotit vliv vlhkosti a objemové hmotnosti měřeného materiálu.

Metodika

- Vypracování literární rešerše s využitím vědeckých databází: Web of Science, Scopus, Google Scholar a dalších.
- Na základě aktuálního stavu poznání navrhnout vhodný způsob měření odpovídajících dielektrických veličin.
- Vyhodnotit výsledky moderními statistickými metodami.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

měření, permitivita, ztrátový faktor, zhodnocení

Doporučené zdroje informací

BLAHOVEC, J. Zemědělské materiály. PRAHA: VŠZ, 1993.

NELSON, S. Dielectric properties of agricultural materials and their applications. Boston, MA: Elsevier, 2015. ISBN 9780128023051.

NYSTROM, J., DAHLQUIST, E. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants—A review. Fuel 2004, 83, 773–779.

PAZ, A., THORIN, E., TOPP, C. Dielectric mixing models for water content determination in woody biomass. Wood Sci. Technol. 2011, 45, 249–259.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jakub Lev, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra fyziky

Elektronicky schváleno dne 28. 4. 2023

prof. Ing. Martin Libra, CSc., dr. h. c.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 11. 1. 2024

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 18. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Dielektrické vlastnosti dřevní štěrky – efekt vlhkosti a objemové hmotnosti" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubu Lvovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a pomoc při zpracování této práce.

Dielektrické vlastnosti dřevní štěpky – efekt vlhkosti a objemové hmotnosti

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá změnami dielektrických vlastností vlivem vlhkosti a objemové hmotnosti. V práci je objasněn jak pojem dielektrikum a dielektrické vlastnosti materiálu, tak základní principy jevů, které uvnitř dielektrika vznikají. Dále je popsána vlhkost a navlhavost materiálu a metody určování obsahu vlhkosti v pevných látkách. V experimentální části se práce zabývá měřením dielektrických veličin – elektrická kapacita a ztrátový faktor. Předmětem měření byly dva druhy dřevní štěpky (smrk a jasan). Dielektrické vlastnosti byly měřeny ve frekvenčním rozsahu 10 kHz až 5 MHz s předpokládaným podílem vlhkosti od 0 do 70 %. Dále jsou v práci sledovány závislosti dielektrických veličin na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti. Bylo potvrzeno, že relativní permitivita i ztrátový faktor se zvyšují s rostoucím podílem vlhkosti a objemové hmotnosti. Podle analýzy hlavních komponent je možné vysvětlit změřená data dvěma hlavními komponenty, které vysvětlují 99,79 % variability.

Klíčová slova: měření, permitivita, ztrátový faktor, zhodnocení

Dielectric properties of wood chips – effect of moisture and bulk density

Abstract

This bachelor thesis presents the changes in dielectric properties due to moisture content and bulk density. The thesis explains both the concept of dielectric, dielectric properties of a material and the basic principles of the phenomena that occur inside a dielectric. The moisture and wettability of the material and methods for determining the moisture content of solids are also described. The experimental part of the thesis deals with the measurement of dielectric quantities - electrical capacitance and loss factor. The object of measurements was two types of wood chips (spruce and ash). The dielectric properties were measured over a frequency range of 10 kHz to 5 MHz at moisture content in a range of 0 to 70 % wet basis. Furthermore, the dependence of the dielectric quantities on the moisture content and the bulk density is investigated in this work. It was confirmed that the relative permittivity and loss factor increase with increasing moisture content and bulk density. According to the principal component analysis, the measured data can be explained by two principal components, which explain 99.79 % of the variability.

Keywords: measurement, permittivity, loss factor, evaluation

Obsah

1 Úvod.....	13
2 Současný stav poznání	14
2.1 Charakterizace dielektrik	14
2.2 Relativní permitivita.....	14
2.3 Komplexní permitivita	16
2.3.1 Dielektrické ztráty.....	17
2.3.2 Ztrátový činitel $tg \delta$	18
2.4 Elektrická kapacita	19
2.5 Dielektrická polarizace.....	19
2.5.1 Pružná polarizace	20
2.5.2 Relaxační polarizace	21
2.5.3 Migrační polarizace	23
2.5.4 Zvláštní polarizace	23
2.5.5 Elektroková polarizace	24
2.6 Vlhkost a navlhavost materiálu.....	24
2.6.1 Vlhkost vzduchu	24
2.6.2 Navlhavost (hygroskopičnost)	26
2.6.3 Voda v pevných materiálech.....	26
2.7 Objemová hmotnost	26
2.8 Metody určování obsahu vlhkosti	27
2.8.1 Přímé metody	27
2.8.2 Nepřímé metody	28
3 Cíl práce	30
4 Materiály a metody	31
4.1 Materiály	31
4.2 Příprava vzorků	31
4.3 Postup měření.....	32
5 Výsledky a diskuse	35
6 Závěr.....	45
7 Seznam použitých zdrojů	46

Seznam obrázků

Obr. 1: Vektorový diagram veličin intenzity elektrického pole, elektrické indukce a permitivity	16
Obr. 2: Relativní příspěvky skutečné a imaginární složky permitivity pro typický dielektrický materiál [9].....	17
Obr. 3: Sériové zapojení s fázorovým diagramem [14].....	18
Obr. 4: Paralelní zapojení s fázorovým diagramem [14].....	19
Obr. 5: Elektronová polarizace [5]	21
Obr. 6: Iontová polarizace [5].....	21
Obr. 7: Dipólová relaxační polarizace [5]	23
Obr. 8: Migrační polarizace [5]	23
Obr. 9: Schéma vzniku iontové dvojvrstvy na rozhraní elektroda-vzorek [20].....	24
Obr. 10: Foto a průřez přípravku na měření	33
Obr. 11: Závislosti mezi podílem vlhkosti, relativní permitivitou a ztrátovým faktorem u vybraných frekvencích u smrku při výšce materiálu 15,7 mm. (a) - závislost relativní permitivity na podílu vlhkosti, (b) – závislost ztrátového faktoru na podílu vlhkosti.....	35
Obr. 12: Závislost mezi podílem vlhkosti, relativní permitivitou a ztrátovým faktorem u vybraných frekvencích u jasanu při výšce materiálu 15,7 mm. (a) – závislost relativní permitivity na podílu vlhkosti, (b) – závislost ztrátového faktoru na podílu vlhkosti.....	36
Obr. 13: Závislost relativní permitivity na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti u smrku....	37
Obr. 14: Závislost ztrátového faktoru na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti u smrku.....	37
Obr. 15: Závislost relativní permitivity na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti u jasanu....	38
Obr. 16: Závislost ztrátového faktoru na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti u jasanu	38
Obr. 17: Závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na objemové hmotnosti při 1 MHz u vzorku S15	39
Obr. 18: Závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na objemové hmotnosti při 1 MHz u vzorku S5B	39
Obr. 19: Závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na objemové hmotnosti při 1 MHz u vzorku J15.....	40
Obr. 20: Závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na objemové hmotnosti při 1 MHz u vzorku J5B	40
Obr. 21: Analýza hlavních komponent (PCA) dielektrických vlastností smrku a jasanu při různých frekvencích, ϵ – relativní permitivita, D – ztrátový faktor.....	41
Obr. 22: Analýza hlavních komponent (PCA) dielektrických vlastností smrku	42
Obr. 23: Analýza hlavních komponent (PCA) dielektrických vlastností jasanu	43

Seznam použitých symbolů

\vec{P}	[Cm ⁻²]	vektor polarizace
$\Delta\vec{M}$	[Cm]	dipólový moment objemového elementu ΔV
ΔV	(m ³)	objemový element látky
\vec{E}	[Vm ⁻¹]	vektor intenzity elektrického pole
\vec{D}	[Cm ⁻²]	vektor elektrické indukce
ϵ_r	[-]	relativní permitivita
ϵ_0	[Fm ⁻¹]	permitivita vakua
C	[F]	kapacita kondenzátoru s dielektrikem
C_0	[F]	kapacita kondenzátoru s vakuem
ϵ^*	[-]	komplexní permitivita
ϵ'	[-]	reálná složka komplexní permitivity
ϵ''	[-]	imaginární složka komplexní permitivity
ϵ_s	[-]	statická permitivita
ϵ_∞	[-]	optická permitivita
ω	[rads ⁻¹]	úhlová rychlost
τ	[s]	relaxační doba
δ	[rad]	ztrátový úhel
Q	[C]	elektrický náboj
U	[V]	rozdíl potenciálu mezi vodiči
Φ	[-]	absolutní vlhkost vzduchu
m	[kg]	hmotnost vodní páry
V	[m ³]	objem vzduchu
φ	[-]	relativní vlhkost vzduchu
w	[-]	vlhkost
c_v	[-]	podíl vlhkosti

m_v	[kg]	hmotnost vody
m_s	[kg]	hmotnost po vysušení
m_t	[kg]	hmotnost před vysušením
A	[m ³]	plocha desek kondenzátoru
d	[m]	vzdálenost desek kondenzátoru
m_1	[kg]	hmotnost vysoušecí misky s vlhkou dřevní štěpkou
m_2	[kg]	hmotnost vysoušecí misky
m_3	[kg]	hmotnost vysoušecí misky se suchou dřevní štěpkou
m_{dv}	[kg]	hmotnost dávky vody
c_{vc}	[-]	požadovaný podíl vlhkosti vzorku
m_{v0}	[kg]	hmotnost vody v základním vzorku
y_{ij}	[-]	standardizovaná hodnota proměnné
x_{ij}	[-]	původní hodnota proměnné
\bar{x}_j	[-]	výběrový průměr proměnné
s_{ij}	[-]	směrodatná odchylka proměnné

1 Úvod

Od začátku 21. století probíhá značné úsilí na ukončování využívání fosilních paliv a jejich nahrazování obnovitelnými zdroji energie. Převážně za to může jejich kontribuce ke skleníkovému efektu a následné změně klimatu. Cíl Evropské Unie je, aby se obnovitelné zdroje podíleli na spotřebě energie EU z 42,5 % do roku 2030. Aktuální podíl obnovitelných zdrojů na spotřebě je 23 % [1].

Jeden z používaných obnovitelných zdrojů je biomasa. Z energetického hlediska je důležitá pouze biomasa, která je energeticky využitelná. V našich podmínkách lze využívat odpadní biomasu (rostlinné a lesní odpady) a záměrně produkovanou biomasu k energetickým účelům. Jedna z forem pevné biomasy je dřevní štěpka, která je využitelná zejména pro energetické účely. V průmyslu má ale více využití a jako primární zdroj suroviny se používá v řadě jiných průmyslových odvětvích, včetně biorafinérií, výroby pelet/briket a papírenského průmyslu. V energetickém sektoru, ale nastává problém s její nekonzistentní kvalitou (obsah vlhkosti/popela, velikost částic). Obsah vody v dřevní štěpce ovlivňuje její výhřevnost a způsobuje problémy s jejím spalováním, jelikož voda se neúčastní reakce a pouze přijímá tepelnou energii při vypařování. S obsahem vlhkosti a výhřevností paliva samozřejmě souvisí i jeho cena.

Bakalářská práce začíná literární rešerší, kde první kapitola se zaměřuje na teoretický popis dielektrik, který zahrnuje vysvětlení pojmu dielektrikum a dielektrické vlastnosti. Další kapitola je věnována principu polarizace dielektrik a různým polarizačním mechanismům. Dále se práce zabývá vlhkostí a navlhavostí materiálu. Navazující kapitola je zaměřená na metody určování obsahu vlhkosti, jejich rozdělení a popis základního principu.

Dle literární rešerše bylo připraveno měření dielektrických vlastností dřevní štěpky. Nejprve jsou obecně popsány měřené materiály, a poté popsána příprava vzorků. Následuje vlastní měření při různých frekvencích a vyhodnocení dat.

2 Současný stav poznání

2.1 Charakterizace dielektrik

Dielektrikum je izolační materiál, který je schopen polarizace. Pokud je dielektrikum umístěno do elektrického pole, dochází k polarizaci, kdy kladné náboje v dielektriku jsou posunuty ve směru elektrického pole a záporné náboje jsou posunuty ve směru opačném k elektrickému poli. Míra posunutí ale není dostatečně velká, aby vytvořily tok proudu materiálem. Po odstranění elektrického pole se buď vrátí do původního nepolarizovaného stavu nebo zůstane polarizované, pokud jsou molekulární vazby v materiálu slabé [2; 3; 4]. Dielektrické materiály se používají v kondenzátorech pro ukládání energie nebo v transformátorech jako izolanty. Dielektrické materiály s vysokou relativní permitivitou se používají pro zvýšení výkonu polovodičového zařízení [5].

Dielektrika se rozdělují na polární a nepolární.

Polární dielektrika

U polárních dielektrik se střed kladných a záporných částic neshoduje. Molekuly mají asymetrický tvar a v materiálu existuje dipólový moment i bez působení vnějšího elektrického pole. Když začne působit elektrické pole, molekuly se orientují podle směru tohoto pole. Když působení elektrického pole ustane, molekulový moment se vynuluje. Příkladem polárního dielektrika je voda [4; 6].

Nepolární dielektrika

U nepolárních dielektrik se střed kladných a záporných částic shoduje. Molekuly mají symetrický tvar a v materiálu není dipólový moment. Působením přitažlivé a odpudivé elektrické síly se z atomů a molekul stanou elektrické dipóly. Příkladem nepolárního dielektrika je vodík, kyslík nebo dusík [4; 6].

Dielektrika se vyskytují v pevné formě (keramika, plast, sklo), kapalně formě (destilovaná voda) i plynně formě (suchý vzduch, vakuum, dusík, helium).

2.2 Relativní permitivita

Průběh polarizačních jevů lze sledovat dvěma způsoby. Z mikroskopického hlediska, kde nás zajímají nosiče elektrického náboje a jejich elektrizování nebo z makroskopického hlediska, kde nás zajímají vnější projevy polarizačních dějů. Z makroskopického hlediska nás tedy zajímá výsledek polarizace, což je vznik vázaného elektrického náboje na povrchu zpolarizovaného dielektrika. To znamená, že dielektrikum jako celek získá dipólový moment.

Na základě toho můžeme definovat vektor polarizace \vec{P} (Cm^{-2}), který charakterizuje polarizované dielektrikum a můžeme ho definovat jako:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (1)$$

kde:

$\Delta \vec{M}$ – dipólový moment objemového elementu ΔV

ΔV – objemový element látky (m^3)

Po vložení dielektrika do vnějšího elektrického pole o intenzitě \vec{E} (Vm^{-1}) se elektrická indukce \vec{D} (Cm^{-2}) vlivem polarizačních jevů zvýší o hodnotu vektoru polarizace \vec{P} oproti elektrické indukci ve vakuu. Nejčastěji se pro charakterizaci polarizačních dějů používá permitivita.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E} \quad (3)$$

kde:

ε_r – relativní permitivita (-)

ε_0 – permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)

Zvýšení elektrické indukce v důsledku polarizace při konstantní intenzitě se projevuje zvětšením náboje na elektrodách měřicího kondenzátoru. Tento jev je využíván při praktickém určování relativní permitivity, kdy se měření elektrické indukce přeměňuje na měření kapacity, kdy:

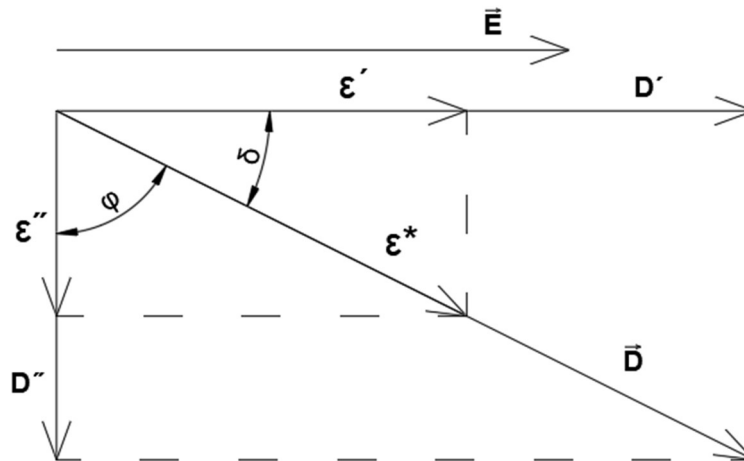
$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (4)$$

kde:

C – kapacita kondenzátoru s dielektrikem (F)

C_0 – kapacita stejného kondenzátoru s vakuem (F)

Relativní permitivita je fyzikální bezrozměrná konstanta, která vyjadřuje kolikrát se elektrická síla zmenší v případě, kdy je těleso s elektrickým nábojem umístěno v látkovém prostředí místo vakua nebo kolikrát se zvětší kapacita kondenzátoru, umístí-li se dielektrikum mezi elektrody. Její hodnota závisí na typu dielektrika, okolních fyzikálních podmínkách (teplota a tlak) a frekvenci, pokud se kondenzátor používá v obvodu s proměnným napětím. Dielektrika mají relativní permitivitu vždy větší než 1 a většina se pohybuje v rozmezí 1-10, přičemž feroelektrické látky dosahují hodnot od 100-1000 [7; 8; 9; 10].



Obr. 1: Vektorový diagram veličin intenzity elektrického pole, elektrické indukce a permitivity

2.3 Komplexní permitivita

Před jednotlivými polarizačními procesy je nutné ještě definovat velmi podstatnou veličinu, která se používá pro popis dielektrických, respektive feroelektrických materiálů. Jedná se o komplexní permitivitu a její definiční vztah je:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5)$$

kde:

ε^* – komplexní permitivita (-)

ε' – reálná složka, která představuje míru kapacitního charakteru dielektrika (-)

ε'' – imaginární složka, která představuje energetické ztráty (-)

j – imaginární jednotka

Kmitočtová závislost (při $T = \text{konst.}$) komplexní permitivity ztrátového dielektrika lze také podle Debyeho teorie vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (6)$$

kde:

ε_s – statická permitivita (pro $f \rightarrow 0$) (-)

ε_∞ – optická permitivita (pro $f \rightarrow \infty$) (-)

ω – úhlová rychlost (rads^{-1})

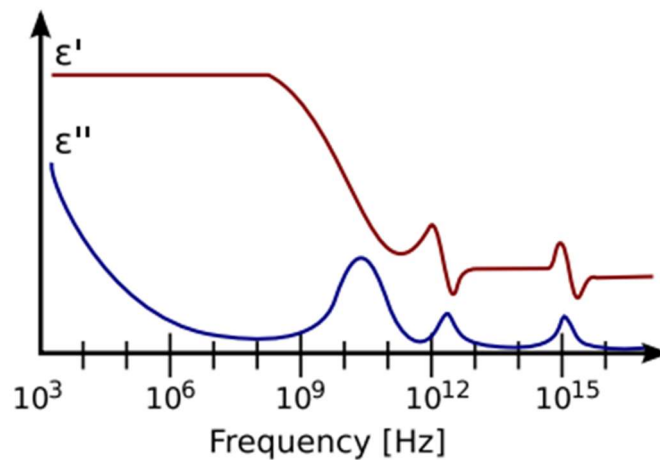
τ – relaxační doba (s)

Pro složky ε' a ε'' tedy platí:

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (7)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega \tau (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (8)$$

Komplexní permitivita popisuje kombinované efekty permitivity a vodivosti, kdy vodivost je prezentována jako imaginární komponent permitivity [11]. Také charakterizuje refrakční a absorpční vlastnosti materiálu [12].



Obr. 2: Relativní příspěvky skutečné a imaginární složky permitivity pro typický dielektrický materiál [9]

2.3.1 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou energetické ztráty, které nastávají v dielektriku působením elektrického pole. Jsou to ztráty spojené s ohřevem dielektrického materiálu v měnícím se elektrickém poli. Dielektrické ztráty jsou nevyhnutelným důsledkem připojení kondenzátoru ke zdroji napětí bez ohledu na typ napětí (střídavé nebo stejnosměrné). Tyto ztráty jsou komplexní, závislé na vlastnostech dielektrika, jeho chemickém složení, obsahu nečistot (zejména vody), vnitřní struktuře a fyzikálních podmínkách. Hlavní příčinou dielektrických ztrát jsou pohyby volných a vázaných elektrických nábojů účinkem elektrického pole. Další významná příčina je nehomogenita většiny dielektrik. Většina ztrát vzniká na atomární úrovni a mikrostruktura materiálu na ně obvykle nemá vliv, s výjimkou feroelektrických mechanismů a ohmických ztrát. V průmyslu se dielektrické ztráty využívají pro různé účely, jako je sušení materiálů, rychlé želírování, sušení pěnové pryže a předeřívání plastů před jejich zpracováním [13; 14; 15].

Druhy dielektrických ztrát:

- **Vodivostní** – vznikají při průchodu proudu dielektrikem, rostou společně s vodivostí dielektrika a teplotou, nezávisí na frekvenci
- **Polarizační** – vznikají při ztrátových druzích polarizace, jsou závislé na teplotě a frekvenci
- **Ionizační** – vznikají při ionizaci dielektrika při vysoké intenzitě elektrického pole, jsou nejčastěji v plynech, ale jsou přítomny i u pevných a kapalných nehomogenních izolantů s plynovými dutinkami

Celkové dielektrické ztráty jsou součet všech dílčích ztrát [6].

Dielektrické ztráty lze popsat ztrátovým činitelem $tg \delta$.

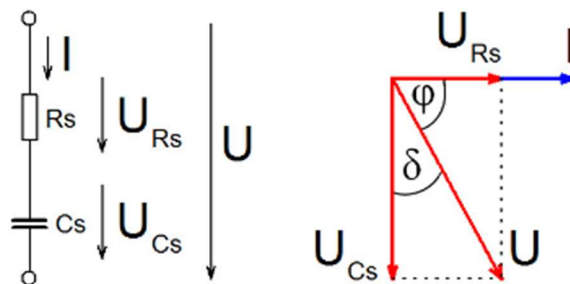
2.3.2 Ztrátový činitel $tg \delta$

Fázový posun δ mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole se nazývá ztrátový úhel. Tangenta ztrátového úhlu se označuje jako ztrátový činitel a podle diagramu z Obr. 1 platí:

$$tg \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (9)$$

Ztrátový činitel je bezrozměrná veličina, podle které lze posuzovat ztráty daného dielektrika. K určení velikosti dielektrických ztrát se využívá ekvivalentní náhradní obvod, složený z ideálního kondenzátoru o kapacitě C a ztrátového rezistoru s ohmickým odporem R , který zahrnuje veškeré ztráty. Používá se paralelní nebo sériové zapojení [13; 16].

Sériové zapojení:

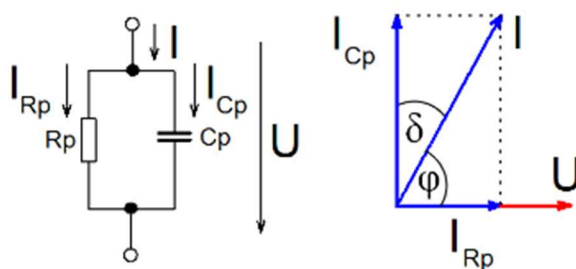


Obr. 3: Sériové zapojení s fázorovým diagramem [14]

Z fázorového diagramu platí:

$$tg \delta = \frac{U_{Rs}}{U_{Cs}} = \frac{IR_s}{\frac{I}{\omega C_s}} = \omega C_s R_s \quad (10)$$

Paralelní zapojení:



Obr. 4: Paralelní zapojení s fázorovým diagramem [14]

Z fázorového diagramu platí:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_{Rp}}{I_{Cp}} = \frac{U}{R_p} \cdot \frac{1}{\omega C_p R_p} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (11)$$

2.4 Elektrická kapacita

Kapacita je vlastnost elektrického vodiče, která udává, jaké množství elektrického náboje je tento vodič schopen uložit. Když se elektrický náboj přenáší mezi dvěma původně nenabitými vodiči, oba se nabijí stejně, jeden kladně, druhý záporně a mezi nimi se vytvoří rozdíl potenciálu [17]. Elektrickou kapacitu lze definovat jako:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (12)$$

kde:

Q – elektrický náboj (C)

U – rozdíl potenciálu mezi vodiči (V)

C – elektrická kapacita (F); jeden farad je extrémně velká kapacita, a proto se běžně používá mikrofarad (μF) a pikofarad (pF)

Měření elektrické kapacity se používá jako jedna z nepřímých metod měření obsahu vlhkosti. Tato metoda je ovlivněna hustotou materiálu, teplotou a frekvencí napětí [18].

2.5 Dielektrická polarizace

Dielektrická polarizace je jev, který nastává v izolačním materiálu v důsledku vnějšího elektrického pole. Když elektrický proud interaguje s dielektrickým materiálem, ten reaguje posunem rozložení náboje, přičemž kladné náboje se uspořádávají podél elektrického pole a záporné náboje se uspořádávají proti němu. Tento jev je klíčový pro vytváření důležitých prvků obvodů, jako jsou kondenzátory [19].

V dielektriku dochází většinou k více současně probíhajících druhů polarizace.

Druhy elektrické polarizace [6]:

Pružná (deformační):

- elektronová
- iontová

Relaxační:

- dipólová
- iontová relaxační

Objemová (migrační):

- mezivrstevová
- vysokonapěťová

Zvláštní:

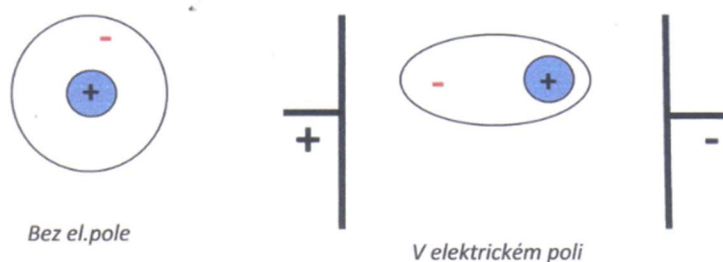
- samovolné
- rezonanční

2.5.1 Pružná polarizace

Při pružné polarizaci dochází k rychlému vychýlení pružně vázaných částic, tedy elektronů a iontů, na minimální vzdálenosti z jeho rovnovážné polohy. Probíhá bez ztrát energie v dielektriku a prakticky nezávisí na teplotě a kmitočtu. Když je dielektrikum odstraněno z elektrického pole, náboje se okamžitě vrátí do svého původního uspořádání [6]. Pružná deformace není závislá ani na tlaku či frekvenci za předpokladu, že nedojde k rozrušení látky či fázové přeměně. Pružné deformace jsou bezztrátové [10].

Elektronová polarizace

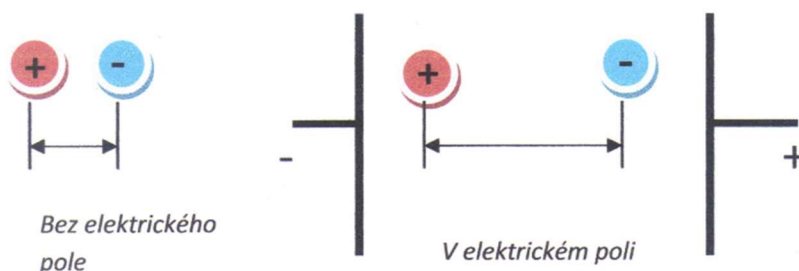
Vlivem vnějšího elektrického pole dochází k porušení symetrie struktury atomů. Dochází k posunutí středu rozložení záporného náboje elektronů vzhledem ke středu kladného jádra. Atomy tedy získávají elektrický dipólový moment. Hodnota elektronové polarizace roste s počtem elektronů, protože elektrony vnějších obalů jsou méně vázány na jádro [20]. V normálním stavu, bez působení vnějšího pole, středy rozložení kladného a záporného náboje splývají. Doba ustálení je $\tau = 10^{-15}$ až 10^{-13} s. Elektronová polarizace není závislá na teplotě [6].



Obr. 5: Elektronová polarizace [5]

Iontová polarizace

Iontová polarizace přispívá k relativní permitivitě a tento typ polarizace se typicky vyskytuje v iontových krystalech jako je NaCl, KCl a LiBr. Při nepřítomnosti vnějšího elektrického pole nedochází k polarizaci, protože dipólové momenty záporných iontů jsou rušeny kladnými ionty. Pokud působí vnější elektrické pole, ionty se přesunou, což vede k indukované polarizaci. Doba ustálení je $\tau = 10^{-13}$ až 10^{-12} s. Nezávisí na frekvenci, ale závisí na teplotě, kdy s rostoucí teplotou se zvyšuje polarizovatelnost [6; 19].



Obr. 6: Iontová polarizace [5]

2.5.2 Relaxační polarizace

Relaxační polarizace se značně liší od předchozích, to jak jak dobou průběhu, tak i formou. Pro relaxační polarizaci jsou charakteristické relaxační pochody. Mechanismus zahrnuje částice, které jsou slabě spojené, jako jsou molekuly plynů a kapalin. V pevných dielektrikách jsou slabě vázané ionty a elektrony především v blízkosti defektů v krystalové struktuře. Důležitým faktorem je teplota, respektive tepelný pohyb nosičů elektrického náboje. Vlivem tepelných pohybů se částice chaoticky přemísťují a nedochází k nerovnoměrnému rozložení. Působením elektrického pole je chaotický pohyb částic částečně usměrněn a nositelé nábojů se natačejí do směru nebo proti směru elektrického pole. Nerovnoměrné rozložení nosičů náboje v jednotkovém objemu způsobuje asymetrii a vytváří tím dipólový moment v

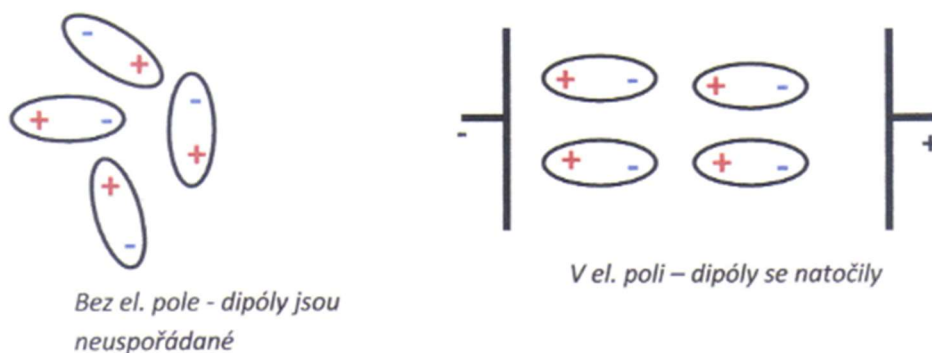
jednotkovém objemu dielektrika. Časový průběh relaxační polarizace není okamžitý jako u pružné deformace, ale přechod od nepolarizovaného dielektrika k dielektriku zpolarizovanému je poměrně dlouhý proces a nenastane ihned po přiložení elektrického pole. Popisovaný průběh lze popsat exponenciálou, charakterizovanou časovou konstantou, zvanou relaxační doba. Přestane-li působit elektrické pole, polarizace pomalu ubývá a nosiče nábojů se vlivem tepelného pohybu vracejí do své původní polohy. Časy ustálení jsou v porovnání s pružnou polarizací mnohem delší, a i vzdálenosti posunu jsou delší. Relaxační polarizace je značně závislá na teplotě a je vždy provázána ztrátami v dielektriku, které se tím ohřívá [10; 13].

Iontová relaxační polarizace

Iontová relaxační polarizace probíhá u dielektrik složených z iontů nebo obsahující skupiny molekul nebo atomů, polární radikály i volné ionty příměsí a nečistot, které jsou slabě vázány k sousedním stavebním částicím látky. Jsou velmi citlivé na vnější elektrické pole. Vyskytuje se například u látek s amorfni strukturou jako jsou anorganická skla, keramické látky s obsahem skloviny nebo anorganické krystalické látky s iontovou vazbou a netěsným uložením částic. Podstatná vlastnost těchto látek je netěsnost vazeb, které vážou jednotlivé částice. Bez přítomnosti elektrického pole se nosiče nábojů rozloží v objemu zcela náhodně a pravděpodobně tedy rovnoměrně a tím nedochází k polarizaci. Začne-li na ně působit vnější elektrické pole, dochází postupně k nerovnoměrnému rozložení nosičů náboje, a tedy ke vzniku dipólového momentu. Je velice silně závislá na teplotě, protože tepelný pohyb částic ovlivňuje polarizační účinek vnějšího elektrického pole. S teplotou roste tepelný chaotický pohyb slabě vázaných částic, což převažuje nad snahou elektrického pole o jejich uspořádání. S nárůstem teploty klesá jak polarizovatelnost, tak polarizace. Doba ustálení je 10^{-12} – 10^{-8} s [10; 13].

Dipólová relaxační polarizace

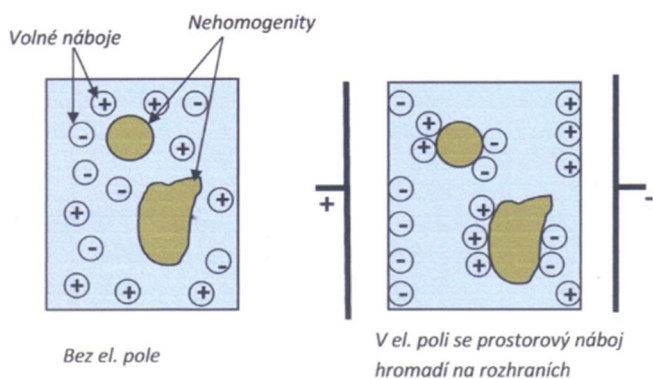
Dipólová relaxační polarizace, někdy také nazývána orientační, se vyskytuje v polárních látkách, jejichž dipólové molekuly jsou jen slabě vázány nebo jsou úplně volné, takže se vlivem elektrického pole mohou natáčet do směru silových čar pole. Polarizace je opět silně závislá na teplotě, protože tepelný pohyb překáží natáčení molekul účinkem vnějšího elektrického pole. Doba ustálení je 10^{-12} – 10^{-8} s u nízkomolekulárních látek. U makromolekulárních je doba ustálení vyšší [10; 13].



Obr. 7: Dipólová relaxační polarizace [5]

2.5.3 Migrační polarizace

Polarizačních jevů se mohou účastnit kromě vázaných nosičů náboje i volné nosiče elektrického náboje. Jedná se pak o migrační polarizaci neboli polarizaci vznikající prostorovým nábojem. Kromě přítomnosti volných nosičů je také potřebná existence makroskopických nehomogenit v daném dielektriku. Po aplikaci elektrického pole se právě na těchto částicích zachytávají pohybující se volné nosiče náboje, což vede k přeskupení a vytvoření nové prostorové hustoty elektrického náboje. Ta se pak tváří jako polarizace dielektrika. Nehomogenitou se rozumí nečistota, bublinka, vakuol, praskliny a další strukturální defekty. Dochází tím tedy ke změně vlastností, zejména relativní permitivity a konduktivity. Nosiče elektrického náboje se na těchto nehomogenitách zachytávají. Migrační polarizace je nejpomalejší, má nelineární charakter, je nepružná a je opět ztrátová [10; 13].



Obr. 8: Migrační polarizace [5]

2.5.4 Zvláštní polarizace

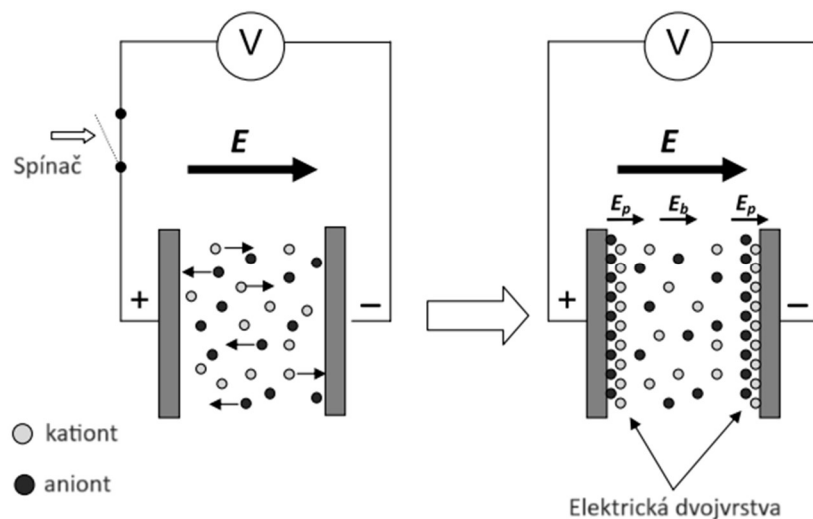
Zvláštní polarizace se rozděluje na samovolnou (spontánní) polarizaci a rezonanční polarizaci.

Samovolná polarizace nastává u látek s doménovou strukturou, jako jsou feroelektrika. Odehrává se bez působení vnějšího elektrického pole během tuhnutí taveniny feroelektrické látky. Je závislá na teplotě [6].

Rezonanční polarizace vzniká na základě rezonance vlastních oscilací elektronů a iontů v látce s kmity vnějšího elektrického pole při velmi vysokých frekvencích [13].

2.5.5 Elektrodová polarizace

Všechny vodivé systémy obsahují rozpuštěné volné ionty. Při působení elektrického pole mají tyto ionty tendenci pohybovat se směrem k rozhraní elektroda-vzorek, což vede k vývoji iontových dvojvrstev v těchto oblastech, jak je vidět na Obr. 9. Působící napětí v těchto vrstvách rapidně klesá, což znamená velkou polarizaci materiálu a téměř absenci elektrického pole v objemovém vzorku při nízkých frekvencích. Výsledná kapacita těchto vrstev může být převládající signál na nižších frekvencích a maskovat tak relaxaci. Účinek elektrodové polarizace může záviset na míře vodivosti vzorku, teplotě vzorku, struktuře elektrod, jejich složení, a dokonce drsnosti povrchu elektrod. To může být dále komplikováno probíhajícími elektrochemickými reakcemi na elektrodě [21].



Obr. 9: Schéma vzniku iontové dvojvrstvy na rozhraní elektroda-vzorek [20]

2.6 Vlhkost a navlhavost materiálu

2.6.1 Vlhkost vzduchu

Vlhkost je základní vlastností vzduchu. Určuje, jaké množství vody v plynném stavu (vodní páry) je v daném množství vzduchu. Rozlišujeme dva typy vlhkosti vzduchu – absolutní a relativní vlhkost.

Absolutní vlhkost vzduchu

Absolutní vlhkost vzduchu Φ je hmotnost vodní páry obsažené v 1 m³ vlhkého vzduchu [22]. Absolutní vlhkost vzduchu lze vyjádřit jako:

$$\Phi = \frac{m}{V} \quad (13)$$

kde:

m – hmotnost vodní páry (kg)

V – objem vzduchu v (m^3)

Absolutní vlhkost výrazně kolísá v závislosti na teplotě. Nejvyšší možnou hodnotu absolutní vlhkosti má vzduch, který je nasycen vodními parami. Jakoukoli další vlhkost by vzduch nemohl přijmout, protože by došlo k její kondenzaci ve formě rosy [13].

Relativní vlhkost vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu je experimentálně odvozená měřitelná veličina. Je to poměr absolutní vlhkosti vzduchu Φ k absolutní vlhkosti nasyceného vzduchu při stejné teplotě Φ_n , neboli poměr mezi okamžitým množstvím vodní páry ve vzduchu m k množství vodní páry M , kterou by vzduch měl při stejné teplotě a tlaku při plném nasycení. Z rovnice izotermy vyplývá, že nabývá hodnot (0;1) [22].

Relativní vlhkost vzduchu definujeme jako:

$$\varphi = 100 \frac{\Phi}{\Phi_n} \quad (14)$$

Tento vztah lze také přepsat jako:

$$\varphi = 100 \frac{m}{M} \quad (15)$$

V technické praxi se obvykle vlhkost vyjadřuje pomocí relativní vlhkosti. Vzduch s obsahem vody nižším než 50 % je považován za „suchý“, zatímco vzduch s obsahem 70-80 % je vnímán jako normálně vlhký. Vlhčí vzduch, který má obsah vody 90 % a více, je klasifikován jako velmi vlhký. Obvykle se relativní vlhkost pohybuje mezi 40 a 75 % [13].

Rosný bod

Teplota rosného bodu je hodnota, na kterou se musí ochladit vlhký vzduch, aby dosáhl maximálního nasycení. To znamená, že je dosaženo stavu, kdy je vzduch maximálně nasycen vodními parami a při měření by to znamenalo, že relativní vlhkost vzduchu $\varphi = 100$ %. Pokud by teplota klesala pod tento bod, nastala by kondenzace, tudíž skupenská přeměna, kdy se plyn mění na kapalinu. Teplota rosného bodu je exponenciálně závislá na množství vodní páry ve vzduchu a lze konstatovat, že s rostoucím množstvím vodní páry roste i teplota rosného bodu [23].

2.6.2 Navlhavost (hygroskopičnost)

Navlhavost je schopnost materiálu přijímat vlhkost z okolní atmosféry. Základním dějem je absorpce molekul vody z okolního ovzduší. Jedná se jednak o jev povrchový a jednak vnitřní, kdy nastává penetrace vody do materiálu. Povrchový jev se nazývá adsorpce a druhý jev se nazývá absorpce. Někdy se používá shodné označení sorpce. Obecně se při sorpčních jevech nemusí jednat pouze o sorpci vlhkosti, ale také sorpci jiných plynů a par. Substance, která plyn nebo páru přijímá se nazývá (ad)sorbent a (ad)sorbovaný plyn je (ad)sorbát [13; 24]. Obsah vlhkosti ve dřevě ovlivňuje všechny jeho vlastnosti, ale důležitá je pouze vlhkost obsažená v buněčných stěnách. Vlhkost v buněčných dutinách pouze přidává hmotnost [25].

2.6.3 Voda v pevných materiálech

Když odstraníme vzduch a vodu z materiálu, zbývá tzv. sušina, což je neplynný zbytek po vysušení materiálu. Pro určení obsahu vody v materiálech se obvykle používají dvě hlavní veličiny: vlhkost w a podíl vlhkosti c_v . Tyto veličiny jsou bezrozměrné, ale uvádějí se i v procentech. Před skladováním nebo zpracováním se snižuje vlhkost u většiny produktů, protože na ní závisí intenzita biologických procesů (např. pomnožování mikroorganismů), které v rostlinných produktech probíhají [26].

$$w = \frac{m_v}{m_s} \quad (16)$$

$$c_v = \frac{m_v}{m_t} \quad (17)$$

kde:

m_v – hmotnost vody (kg)

m_s – hmotnost po vysušení (kg)

m_t – hmotnost před vysušením (kg)

přičemž platí:

$$c_v = \frac{w}{1+w} \quad (18)$$

2.7 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost nebo také hustota je definována jako hmotnost látky m připadající na objem tělesa V . Určování objemové hustoty dřeva je poměrně těžké, protože dřevo je hygroskopický materiál. Hmotnost i objem jsou znatelně ovlivněny obsahem vlhkosti. Aby se docílilo porovnatelných hodnot, hmotnost i objem jsou stanoveny se specifickým obsahem vlhkosti. Standardně se používá hmotnost po vysušení v peci (prakticky žádná vlhkost).

Další možná metoda je použití hmotnosti po vysušení na vzduchu, která je sice v určité praxi použitelná, ale málo přesná [25; 27].

Obsah látek nazývaných "extrakty" může výrazně ovlivnit hustotu dřeva. Tyto látky, kterých může být od 1 % do 20 %, se obvykle hromadí ve vyšší míře v jádrovém dřevě se zvyšujícím se věkem stromu. Přítomnost těchto extraktů zvyšuje hustotu dřeva, ale neovlivňuje zásadní vlastnosti [27].

Pro ilustraci jsou v tabulce 1 uvedeny průměrné hodnoty vybraných typů dřeva. Hodnoty v tabulce jsou uvažovány čerstvě po porážení, v ustáleném stavu vlhkosti (proschnutím na vzduchu) a po umělém dosušení.

Tabulka 1: Objemová hmotnost dřevin [27]

Dřevina	kg/m ³		
	čerstvé	na vzduchu vyschlé	uměle dosušené
Borovice lesní	700	520	510
Bříza	940	600	590
Buk	990	720	570
Dub letní a zimní	1000	760	660
Jasan	920	720	620
Jedle	1000	460	420
Lípy	730	520	420
Modřín	760	600	460
Smrk	740	470	440
Vrby	1000	460	370

2.8 Metody určování obsahu vlhkosti

Obsah vlhkosti patří k nejdůležitějším vlastnostem dřevní štěpky. Metody jejího určení byly sledovány z různých perspektiv, které lze obecně rozdělit na 2 kategorie: přímé a nepřímé.

2.8.1 Přímé metody

Sušení v peci

Gravimetrická metoda používá k určení vlhkosti váhu dřevní štěpky. Dřevní štěpka se zváží na přesné váze a tato váha se porovná s její váhou po vysušení v sušárně. Tato metoda může být použita, pokud není požadována nejvyšší preciznost stanovení obsahu vlhkosti, např. pro rutinní kontrolu v místě výroby. Pro měření může být využit vlhkostní analyzátor, který vzorek nahřeje na přibližně 160 °C a sleduje váhu odstraněné vody, dokud není váha konstantní. Takové měření může trvat od 5 do 15 minut, ale není tak přesné jako při měření podle norem ASTM E871, ISO 18134-1 nebo ISO 18134-2. Metoda není vhodná pro měření vlhkosti v reálném čase. Vzhledem k tomu, že lze sušit pouze několik vzorků najednou, je metoda náchylná na chyby ve vzorkování [28].

Destilační metoda

Destilační metoda zahrnuje společnou destilaci vody ve vzorku s rozpouštědlem s vysokým bodem varu, které je nemísitelné s vodou. Běžně se používá toluen, tetrachlorethylen a xylen. Směs se zahřívá v aparátu a vlhkost se vypařuje a stoupá. V chladiči kondenzuje a shromažďuje se v odměrné trubici, kde je možné určit vypařené množství. Veškeré odpařené rozpouštědlo je zkondenzováno a vráceno do směsi. Destilace se ukončuje, pokud 15 minut nepřibyla žádná voda. Zachycená voda se změří a stanoví se obsah vlhkosti [29; 30].

2.8.2 Nepřímé metody

Nepřímé metody na rozdíl od přímých nejsou vůči materiálu destruktivní. Nepřímé metody využívají různé strategie sběru dat, jako je blízká infračervená spektroskopie, elektrická kapacita, elektromagnetické signály, signály Wi-fi, obrázky a další [28; 31].

Blízká infračervená spektroskopie (NIR)

Podstatou této metody je, že při osvětlení materiálu infračerveným světlem bude část světla absorbována a část odražena. Měřením odrazu od povrchu lze pro každý materiál určit infračervené spektrum. Spektrum závisí na chemickém složení, hustotě a obsahu vlhkosti. Materiál je osvětlován lampou s vlnovou délkou od 800 do 2500 nm. Čočka sbírá odražené vlnové délky a přenáší je do detektoru. Metoda je pro svou rychlost a požadavky na žádnou či menší manipulaci se vzorky vhodná pro aplikaci v reálném čase. Velkou výhodou je, že může pracovat v nepříznivých podmínkách, včetně zmražené a nezmražené pevné biomasy. Nevýhodou je, že měření probíhá pouze na povrchu, což ji činí nevhodnou pro hromadnou aplikaci [28; 32].

Dielektrická/kapacitní metoda

Voda má výrazné dielektrické vlastnosti ve srovnání s jinými materiály, jako je například dřevo. Proto se dielektrické vlastnosti dřeva mění v poměru s jeho obsahem vlhkosti. S rostoucí vlhkostí roste i relativní permitivita. Principiálně lze rozdíl v permitivitě materiálů umístěných mezi paralelními deskami při dvou různých frekvencích vyjádřit podle rovnice (19).

$$\varepsilon_a - \varepsilon_b = \frac{d(C_a - C_b)}{\varepsilon_0 A} \quad (19)$$

kde:

$\varepsilon_a, \varepsilon_b$ – permitivity dřevní štěpky (-)

C_a, C_b – kapacita paralelních desek při frekvencích a a b (F)

A – plocha desek (m^2)

d – vzdálenost mezi deskami (m)

Pokud jsou A a d nezměněny, $(C_a - C_b)$ poskytne odhad obsahu vlhkosti v dřevní štěpce [28; 31].

Elektrická kapacitní tomografie (ECT)

Nemožnost měření velkého objemu materiálu pomocí NIR spektroskopie a neschopnost měření distribuce vlhkosti ve vzorku u kapacitní metody vedlo k vyvinutí kapacitního senzoru s více elektrodami (8, 12, 16, 18). Měřit lze ve dvou módech – statickém a tomografickém. Ve statickém je pro měření kapacity využito vícero elektrod a jejich kombinace. Tomografický mód umožňuje zobrazování různých variací obsahu vlhkosti v biomase. Permittivita je vypočtena algoritmem z měřených kapacit [28; 33].

Reflektometrie v časové oblasti (TDR)

Metoda je založena na čase, který elektromagnetickému signálu trvá projít určitými dielektrickými materiály. Vlastnosti dřevní štěpky jsou ovlivněny obsahem vlhkosti, což má dopad na fázovou rychlost a dobu, která elektromagnetickému pulzu trvá k průchodu. Vzduchové mezery mohou měnit efektivní relativní permitivitu, což se do jisté míry vyřešilo stlačením materiálu a zmenšením vzduchových mezer. To vedlo k lepšímu lineárnímu modelu, ale lisování zase může změnit další fyzikální vlastnosti dřevní štěpky. TDR se jeví jako dobrá metoda na měření většího objemu materiálu [28].

Duální rentgenová metoda (DXA)

Základním principem je vysílání rentgenového záření dvou různých energetických úrovní, 70 eV (16,9 PHz) a 40 eV (9,68 PHz). Na opačné straně vysílače je pozorován útlum rentgenového záření detektorem. Útlum závisí na tom, kolik energie daný materiál absorbuje. Proto lze složení materiálu odhadnout analýzou útlumu při různých energiích. Metoda je relativní, a proto potřebuje kalibraci [28; 32].

Nukleární magnetická rezonance (NMR)

Metoda NMR využívá interakce magnetických polí. Když je atom vodíku umístěn v externím magnetickém poli, snaží se zarovnat se směrem tohoto pole jako magnetický dipól. Tyto dipóly vytvářejí elektrické pole a indukují proud do cívky, která je navinutá kolem vzorku dřevní štěpky. Tento jev umožňuje měření vlhkosti ve vzorku. Pohyby vodíku jsou detekovány pomocí NMR spektroskopie. Kvůli tomu, že metoda měří množství vodíku ve vzorku, je důležité sledovat objemovou hmotnost nebo ji udržovat na konstantní úrovni [28; 32].

3 Cíl práce

Cílem práce je provedení měření dielektrických vlastností vzorků dřevní štěpky ve frekvenčním pásmu 10 kHz až 5 MHz a vyhodnocení vlivu vlhkosti a objemové hmotnosti daného materiálu.

4 Materiály a metody

4.1 Materiály

Vzorky určené pro měření v experimentální části byly dva druhy dřevní štěpky – smrk a jasan. Vzorky měření, piliny, vznikly zpracováním dřeva očištěného od kůry pomocí motorové pily. Piliny jako vzorky byly vybrány s ohledem na velikost přípravku na měření. Pro exemplář smrku bylo připraveno 16 vzorků s odlišnou vlhkostí a pro exemplář jasanu 17 vzorků s odlišnou vlhkostí. Vzorky byly připraveny s různým předpokládaným podílem vlhkosti c_{vp} , aby se pokryla celá škála měření. V tabulce 2 je vidět rozdělení vzorků podle druhu dřeva (smrk – S; jasan – J) a předpokládaného podílu vlhkosti.

Tabulka 2: Tabulka vzorků obsahující jejich označení a předpokládaný podíl vlhkosti

Smrk				Jasan			
Vzorek	c_{vp} (%)	Vzorek	c_{vp} (%)	Vzorek	c_{vp} (%)	Vzorek	c_{vp} (%)
S0	0	S3B	30	J0	0	J4A	40
S06	6	S4A	40	J06	6	J4B	40
S1A	10	S4B	40	J1A	10	J5A	50
S1B	10	S5A	50	J1B	10	J5B	50
S15	15	S5B	50	J15	15	J6A	60
S2A	20	S6A	60	J17	17	J6B	60
S2B	20	S6B	60	J20	20	J65	65
S3A	30	S70	70	J3A	30	J70	70
				J3B	30		

4.2 Příprava vzorků

Ze základního vzorku byl odebrán referenční vzorek pro stanovení vlhkosti. Vysoušecí miska s vlhkou dřevní štěpkou byla zvážena na laboratorní váze (m_1) a současně byla zvážena hmotnost vysoušecí misky (m_2). Vzorek byl vložen do laboratorní sušárny Venticell 55 od firmy BMT Medical Technology, kde byl vysušen při 105 °C až do dosažení konstantní hmotnosti. Po vysušení dřevní štěpky byla vysoušecí miska se vzorkem opět zvážena (m_3). Pomocí rovnic (17) a (20) byl spočten podíl vlhkosti základního vzorku.

Výpočet podílu vlhkosti podle upravené rovnice (17):

$$c_v = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \quad (20)$$

kde:

m_1 – hmotnost vysoušecí misky s vlhkou dřevní štěpkou (kg)

m_2 – hmotnost vysoušecí misky (kg)

m_3 – hmotnost vysoušecí misky se suchou dřevní štěpkou (kg)

Rozsah podílu vlhkosti vzorků určených pro měření se pohyboval od 0 % do 70 %. Pro dosažení požadovaného rozmezí obsahu vlhkosti byly vzorky podrobeny úpravám. V případě zvýšení vlhkosti byla přidána dávka vody do vzorku dřevěných pilin, vypočtená podle rovnice (21). V opačném případě, kdy bylo nutné snížit vlhkost, byly piliny vysušeny a následně přidána dávka vody opět spočtená podle rovnice (21). Každý vzorek byl uložen do plastového sáčku, který byl náležitě popsán a hermeticky uzavřen. Skladován byl v laboratorní chladničce při kontrolované teplotě 5 °C, s cílem dosáhnout homogenizace obsahu vlhkosti.

Výpočet dávky vody:

$$m_{dv} = \frac{c_{vc}m_s + c_{vc}m_{v0} - m_{v0}}{1 - c_{vc}} \quad (21)$$

kde:

c_{vc} – požadovaný podíl vlhkosti vzorku (-)

m_s – hmotnost sušiny (kg)

m_{v0} – hmotnost vody v základním vzorku (kg)

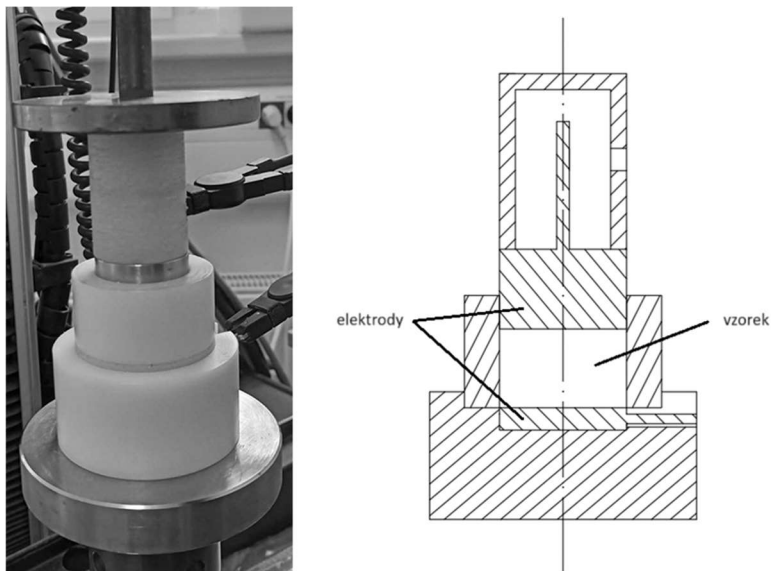
Při výpočtu byla brána úvaha, že základní vzorek dřevní štěpky smrku má podíl vlhkosti 20 % a základní vzorek dřevní štěpky jasanu má podíl vlhkosti 17 %.

4.3 Postup měření

První krok měření bylo odebrání části vzorku, která se vložila do vysoušecí misky a zvažila se její hmotnost na laboratorní váze SCALTEC. Zbytek materiálu ze sáčku se použil na naplnění přípravku na měření. Pro měření byl použit přípravek z polyamidu p6 (viz Obr. 10) s vnitřním průměrem 40 mm a výškou 35,2 mm. Jako dno přípravku sloužila první elektroda o průměru 40 mm. Přípravek na měření se naplnil materiálem a umístil se pod univerzální trhací stroj. Na materiál se umístila druhá elektroda o průměru 40 mm, která se stlačila na výšku materiálu 24,7 mm. Výška materiálu se určovala podle rysky naznačené na elektrodě. Míra nejistoty mohla být přibližně + - 0,5 mm. Tato hodnota sloužila jako počáteční bod měření. Elektrody na přípravku byly připojeny vodiči na vstup měřicího zařízení GW Instek LCR-8110G.

Přes software pro ovládání trhacího stroje Bluehill a skript na PC pro ovládání LCR mostu (https://github.com/tf-czu/lab-measure-tools/tree/master/LCR_gwinstek) se měřila kapacita a ztrátový faktor. Měření se opakovalo při frekvencích 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz a 5 MHz. Počáteční výška materiálu byla pro každé měření přibližně stejná. První měření proběhlo při počáteční výšce materiálu. Po prvním měření se spustil trhací stroj, který rychlostí 3 mm.min⁻¹ stlačil materiál o 3 mm a opět se provedlo měření kapacity a ztrátového faktoru. Tyto kroky se opakovaly do té doby, dokud na trhací stroj

nepůsobila síla 2000 N, což je maximální síla, kterou daný trhací stroj zvládne. Po dosažení této síly se trhací stroj zastavil, naposledy se změřila elektrická kapacita a ztrátový faktor a zaznamenala se poslední uražená vzdálenost. Měření se opakovalo pro každý vzorek. Celkově se změřilo 33 vzorků.



Obr. 10: Foto a průřez přípravku na měření

Vysoušecí misky se vzorky se vložily do laboratorní sušičky Venticell 55, kde byly vysušeny, dokud nebyla konstantní hmotnost. Podle rovnic (17) a (20) byl spočten reálný podíl vlhkosti každého vzorku.

V programu MS Excel byla zpracována tabulka hodnot z měření. Relativní permitivita byla vypočtena dle vztahu pro deskový kondenzátor podle rovnice (22).

$$\varepsilon_r = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A} \quad (22)$$

kde:

C – elektrická kapacita (F)

d – vzdálenost mezi elektrodami (m)

A – plocha elektrod (m^2)

Data v tabulce byla standardizována směrodatnou odchylkou podle rovnice (23), kdy se nová proměnná získá odečtením výběrového průměru \bar{x}_j této proměnné od původní hodnoty x_{ij} a dělením směrodatnou odchylkou s_{jj} této proměnné. Proměnné se tímto převedly na stejné měřítko a přestalo tím záležet na skutečném rozměru příslušných proměnných. Standardizovaná data byla použita na statistickou analýzu (analýza hlavních komponent – PCA) v programu TIBCO Statistica (verze 14.0.0.15, <https://statistica.pro>). PCA je transformace sloužící k dekorelaci dat. Často se používá ke snížení dimenze dat s co nejmenší ztrátou informace.

Princip PCA je vytvoření nových proměnných, které jsou lineární kombinací původně měřitelných proměnných, a které dostatečně vysvětlují původní variabilitu [34].

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_{jj}} \quad (23)$$

kde:

y_{ij} – standardizovaná hodnota proměnné (-)

x_{ij} – původní hodnota proměnné (-)

\bar{x}_j – výběrový průměr proměnné (-)

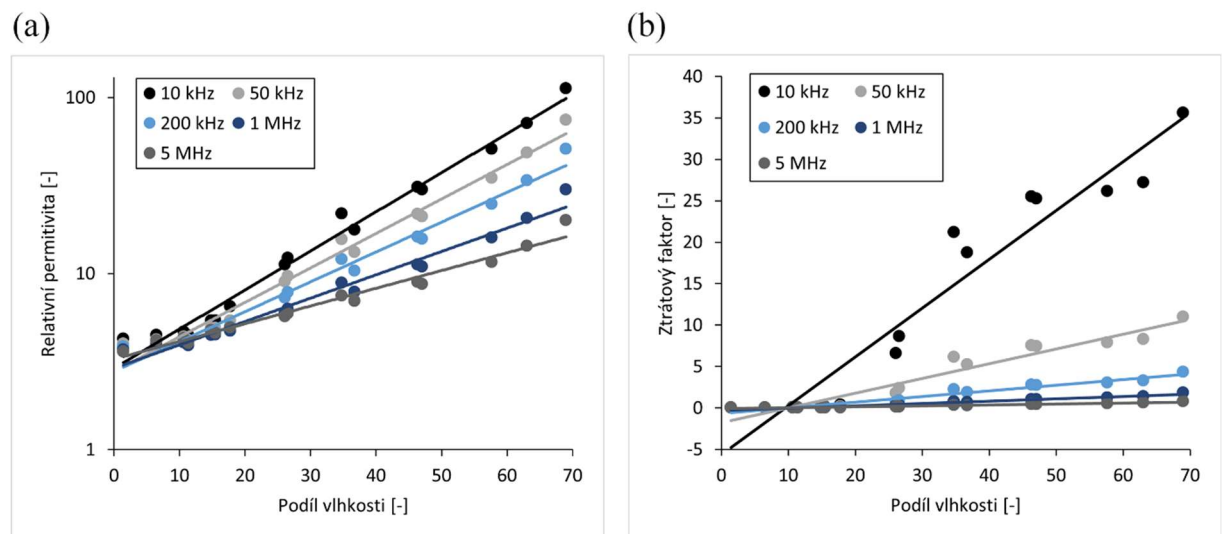
s_{jj} – směrodatná odchylka proměnné (-)

Měření probíhalo během tří dnů. Teplota v místnosti během prvního dne byla 19,4 °C a vlhkost 44,2 %. Druhý den byla teplota 18,4 °C a vlhkost 44,3 % a třetí den 17,6 °C a 38,6 %. Teplota se tedy lišila + - 2 °C, tudíž to mělo minimální vliv na měření.

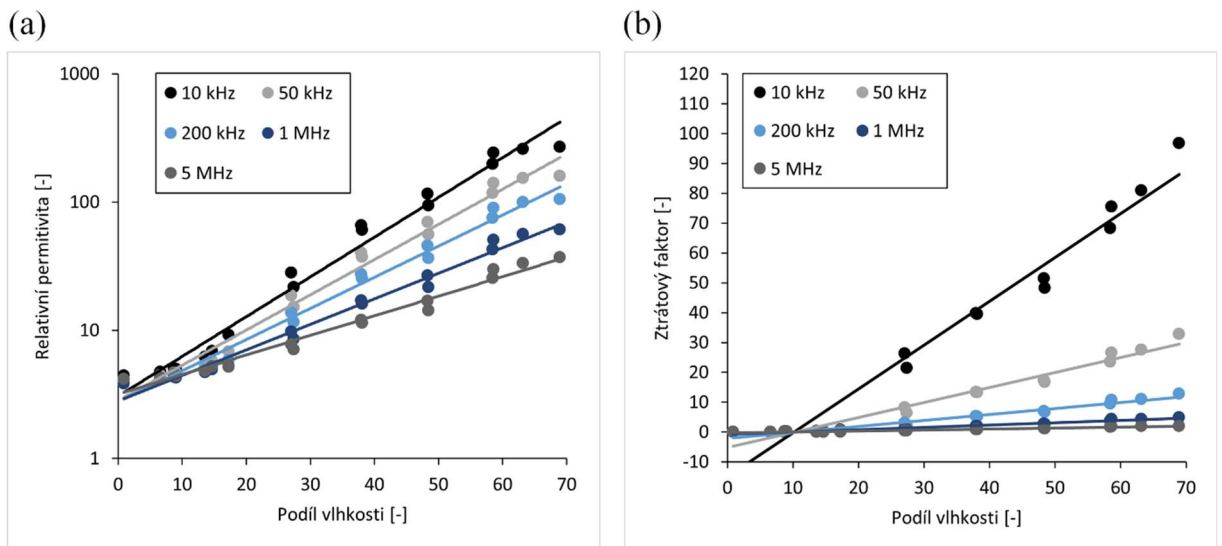
5 Výsledky a diskuse

Závislosti relativní permitivity a ztrátového faktoru na podílu vlhkosti materiálu a objemové hmotnosti jsou ukázány na Obr. 11; 13; 14 pro smrk a na Obr. 12, 15, 16 pro jasan. Na obrázcích jsou ukázány závislosti proměnných při vybraných frekvencích, které byly při měření použity. Část (a) u Obr. 11 a Obr. 12 ukazuje přepočítanou relativní permitivitu z elektrické kapacity a část (b) změřený ztrátový faktor. Podle obrázků je patrné, že křivky závislosti sledovaných veličin jsou při různých frekvencích podobné. Obecně relativní permitivita a ztrátový faktor v závislosti na podílu vlhkosti rostly rychleji při nižších frekvencích než při vyšších. Obě sledované veličiny v závislosti na objemové hmotnosti měly také podobný průběh a rostly rychleji při nižších frekvencích než při vyšších frekvencích.

Obr. 11 a Obr. 12 ukazují změny dielektrických vlastností v závislosti na podílu vlhkosti. Grafy zobrazují data měřená ve výšce materiálu 15,7 mm a ukazují výsledky vybraných frekvencí, při kterých bylo měřeno. Při každé frekvenci se jak relativní permitivita, tak ztrátový číselník zvyšovaly s rostoucím podílem vlhkosti. Protože data relativní permitivity vykazovala exponenciální růst a rozsahy zpracovávaných dat byly vysoké, bylo použito logaritmické měřítko. Proto zobrazená lineární závislost není ve skutečnosti lineární, ale exponenciální.

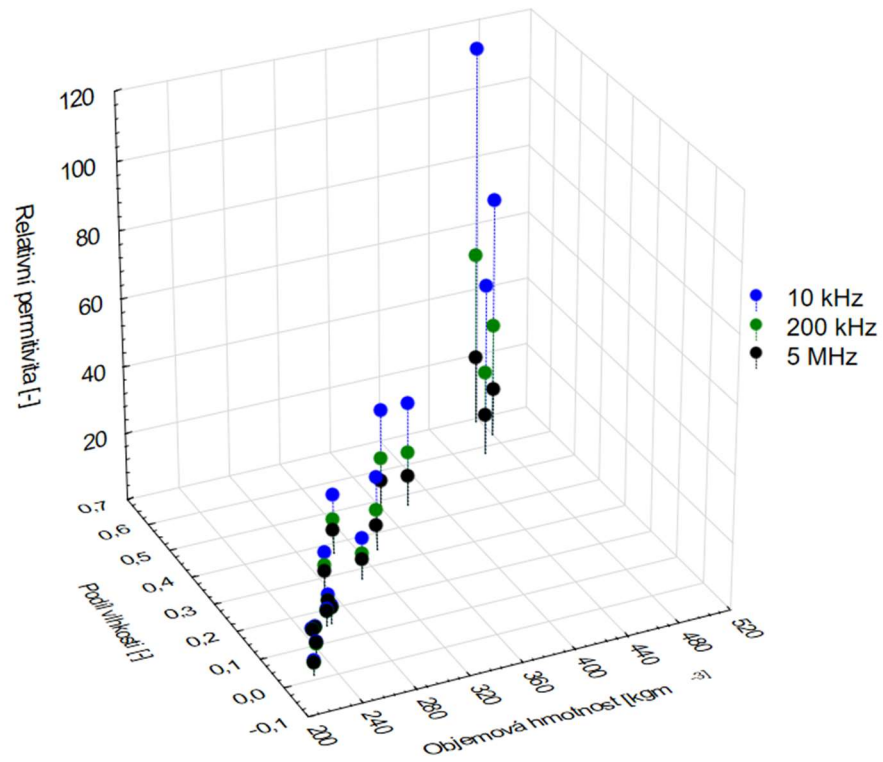


Obr. 11: Závislosti mezi podílem vlhkosti, relativní permitivitou a ztrátovým faktorem u vybraných frekvencích u smrku při výšce materiálu 15,7 mm. (a) - závislost relativní permitivity na podílu vlhkosti, (b) - závislost ztrátového faktoru na podílu vlhkosti

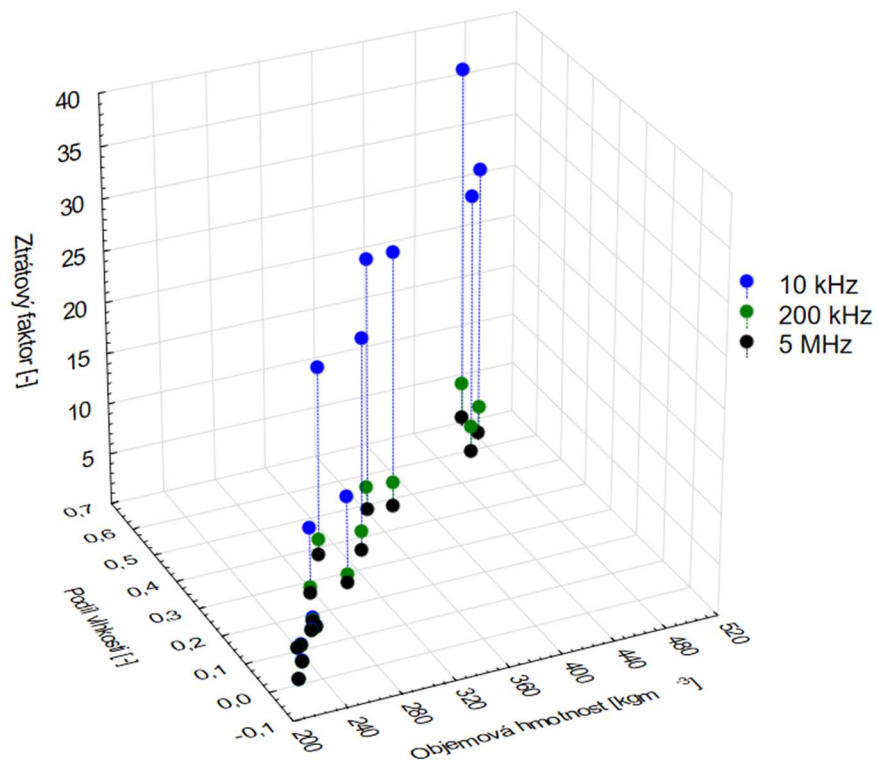


Obr. 12: Závislost mezi podílem vlhkosti, relativní permitivitou a ztrátovým faktorem u vybraných frekvencích u jasanu při výšce materiálu 15,7 mm. (a) – závislost relativní permitivity na podílu vlhkosti, (b) – závislost ztrátového faktoru na podílu vlhkosti

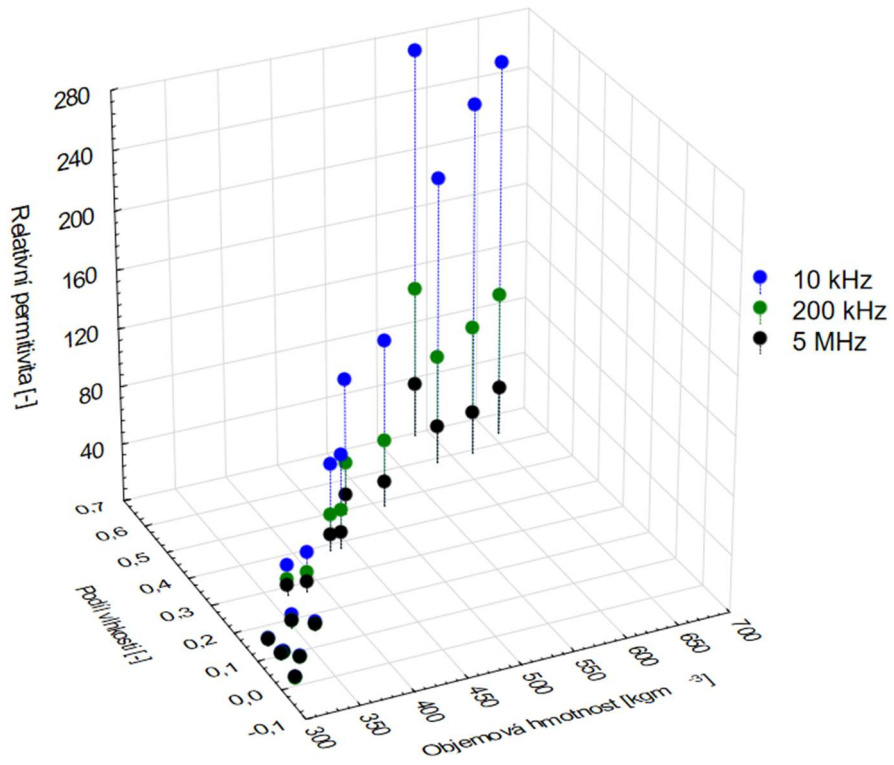
Obr. 13 a Obr. 14 ukazují změny dielektrických vlastností v závislosti na změně podílu vlhkosti a objemové hmotnosti smrku a Obr. 15 a Obr. 16 v závislosti na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti jasanu. Změny byly sledovány u vybraných frekvencích a z obrázků je zřejmé že relativní permitivita i ztrátový faktor stoupají s nabývajícím podílem vlhkosti a objemové hmotnosti a klesají se zvyšující se frekvencí.



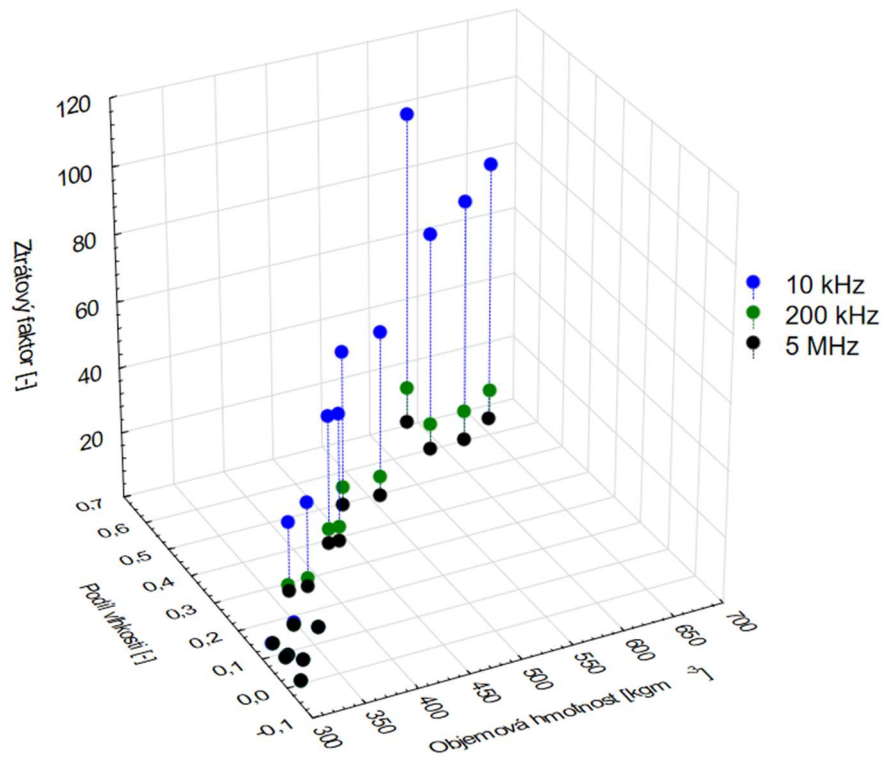
Obr. 13: Závislost relativní permitivity na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti u smrku



Obr. 14: Závislost ztrátového faktoru na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti u smrku

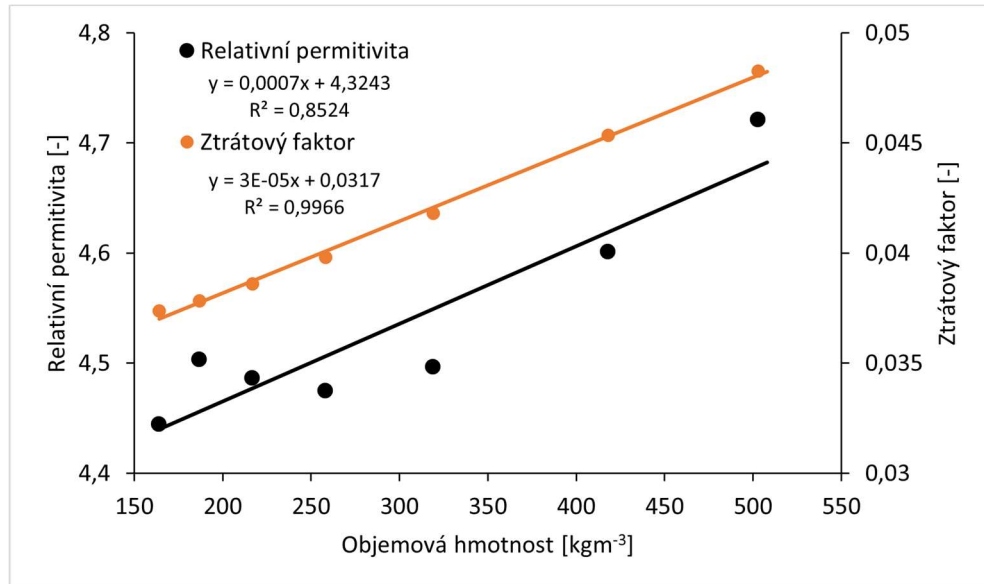


Obr. 15: Závislost relativní permitivity na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti u jasanu



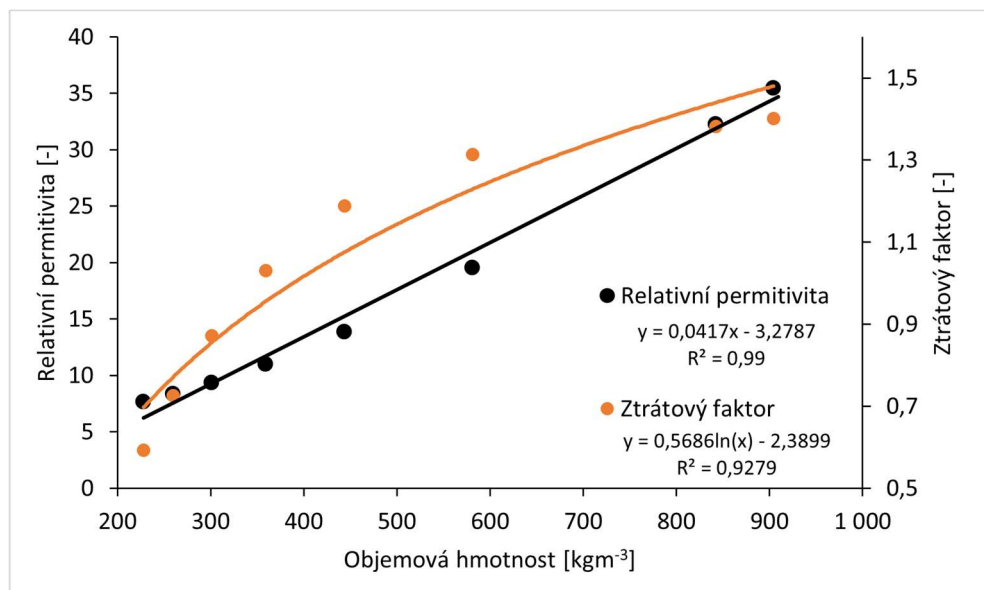
Obr. 16: Závislost ztrátového faktoru na podílu vlhkosti a objemové hmotnosti u jasanu

Obr. 17 znázorňuje grafickou závislost dielektrických vlastností na objemové hmotnosti u vzorku smrku S15 ($c_v = 14,86\%$). Ztrátový faktor rostl s rostoucí objemovou hmotností při všech frekvencích. Relativní permitivita se při všech frekvencích kromě 5 MHz zvyšovala s rostoucí objemovou hmotností.



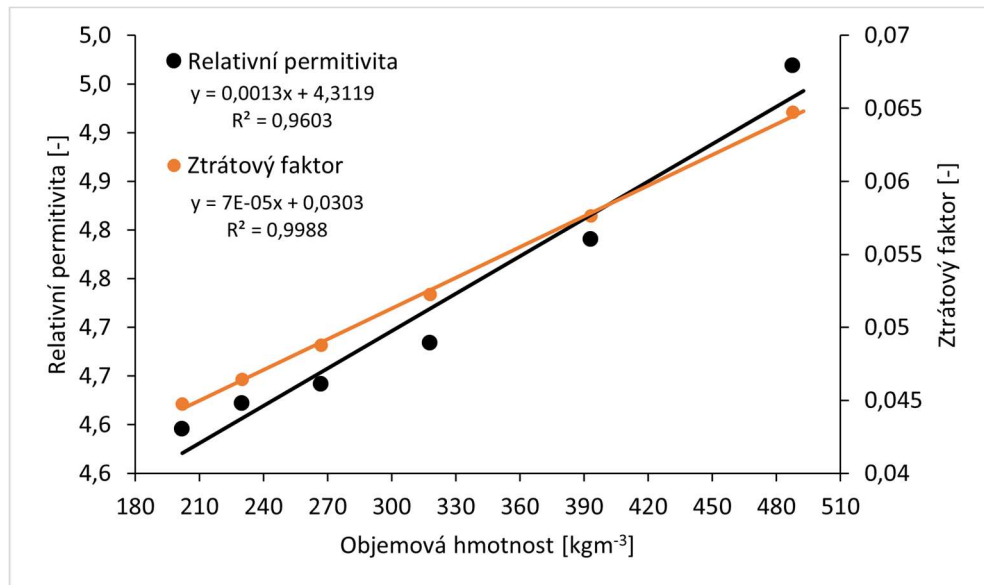
Obr. 17: Závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na objemové hmotnosti při 1 MHz u vzorku S15

Obr. 18 zobrazuje změny dielektrických vlastností na objemové hmotnosti u vlhkého vzorku smrku S5B ($c_v = 47,04\%$). Ztrátový faktor i relativní permitivita měly při všech frekvencích rostoucí trend. Na rozdíl od vzorku S15, kdy ztrátový faktor vykazoval lineární trend, byl u tohoto vzorku použit logaritmický trend, který lépe popisuje tato data.



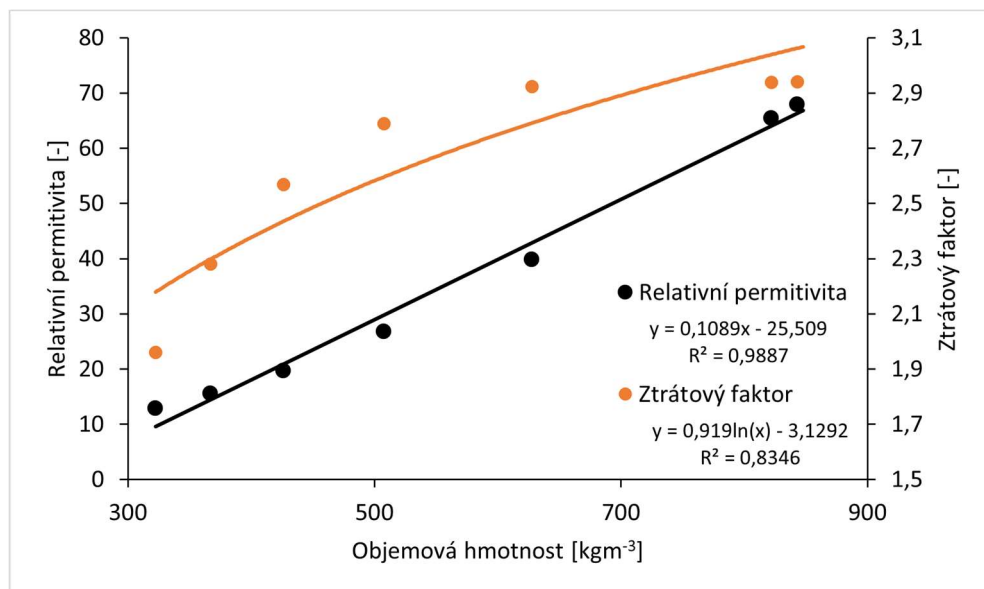
Obr. 18: Závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na objemové hmotnosti při 1 MHz u vzorku S5B

Obr. 19 ukazuje grafickou závislost dielektrických vlastností na objemové hmotnosti vzorku jasanu J15 ($c_v = 13,59\%$). Ztrátový faktor i relativní permitivita se zvyšovaly s rostoucí objemovou hmotností při všech frekvencích.



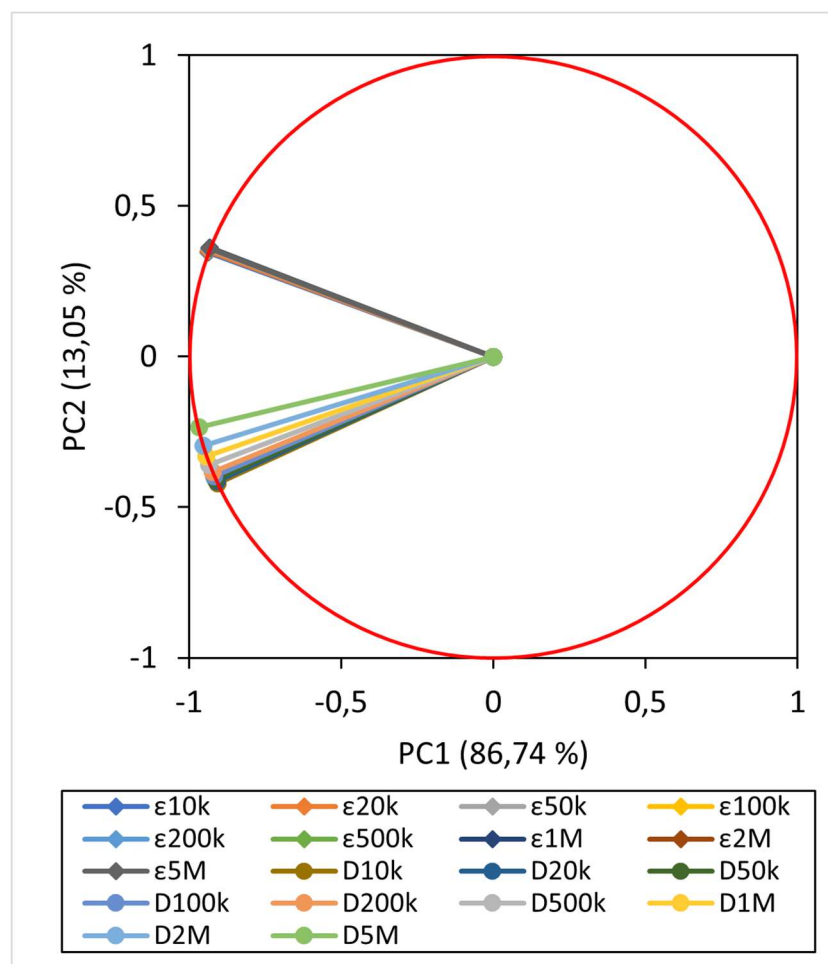
Obr. 19: Závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na objemové hmotnosti při 1 MHz u vzorku J15

Obr. 20 vyobrazuje změny dielektrických vlastností v závislosti na objemové hmotnosti u vlhkého vzorku jasanu J5B ($c_v = 48,3\%$). Ztrátový faktor a relativní permitivita se opět zvyšovaly s rostoucí objemovou hmotností při všech frekvencích.



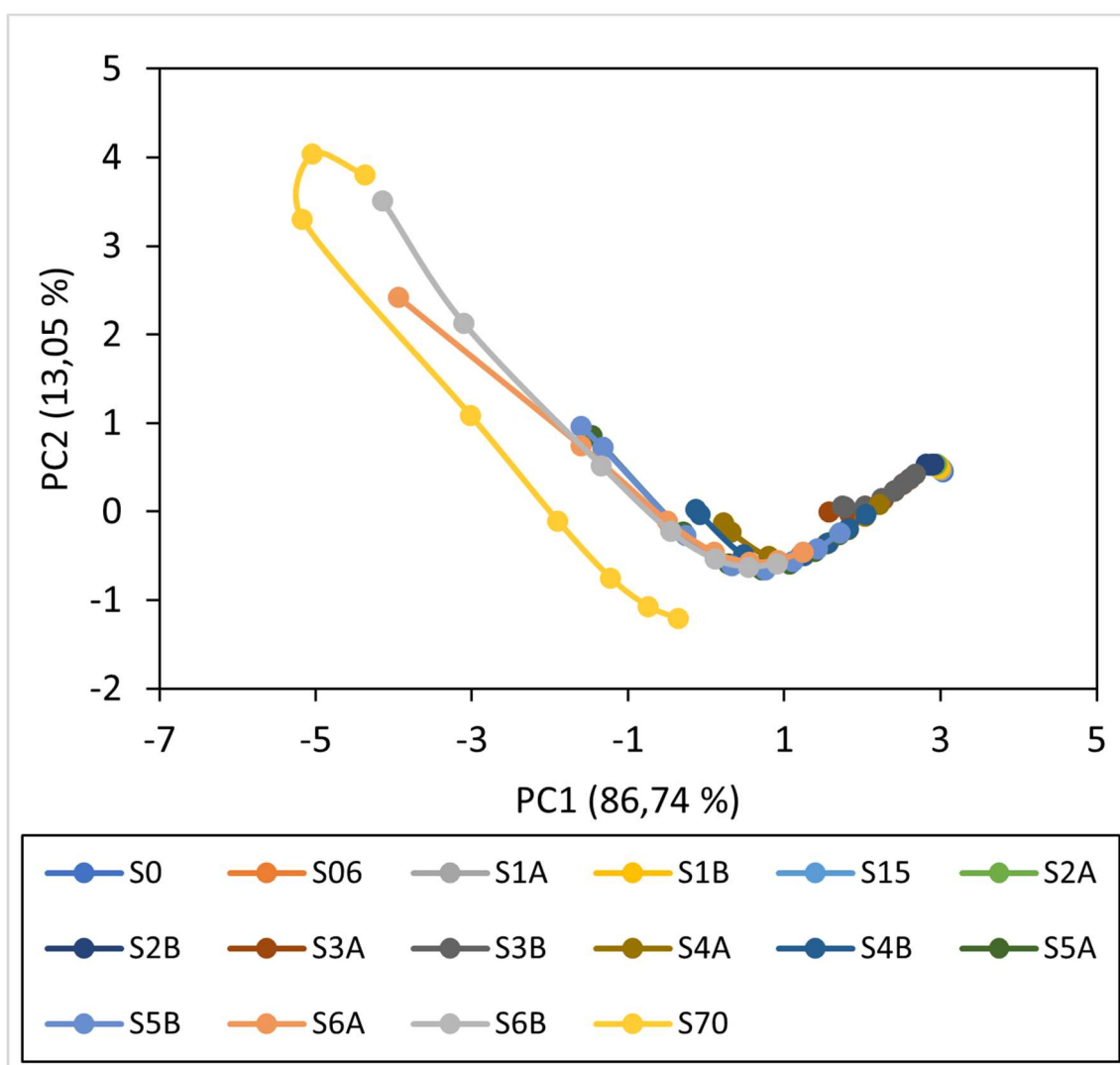
Obr. 20: Závislost relativní permitivity a ztrátového faktoru na objemové hmotnosti při 1 MHz u vzorku J5B

Z Obr. 21 je patrné, že obě dielektrické vlastnosti jsou při různých frekvencích stejně důležité, jelikož všechny proměnné leží na obvodu jednotkové kružnice. Směry jednotlivých veličin ukazují příspěvek k jednotlivým hlavním komponentům. Jak je z obrázku patrné, tak obě veličiny hlavně ovlivňují první hlavní komponentu (PC1) a čím je vyšší frekvence ztrátového faktoru, tím méně ovlivňuje druhou hlavní komponentu (PC2).

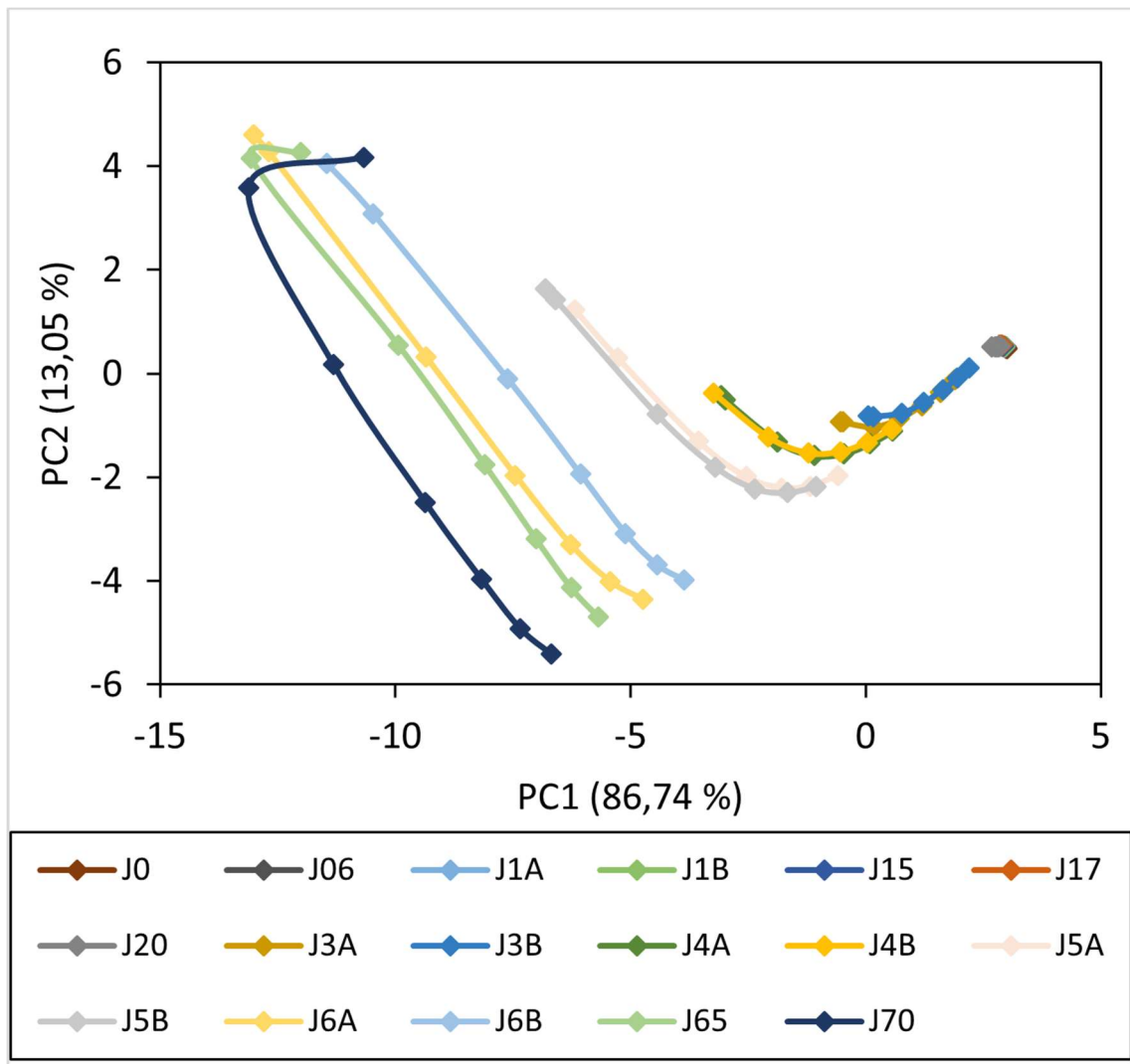


Obr. 21: Analýza hlavních komponent (PCA) dielektrických vlastností smrku a jasanu při různých frekvencích, ϵ – relativní permitivita, D – ztrátový faktor

Analýza hlavních komponent na Obr. 22 a Obr. 23 podrobně popisuje variabilitu relativní permitivity a ztrátového faktoru. Jak je z obrázku zřejmé, naprostá většina variability je vysvětlena prvním hlavním komponentem (86,74 %). Druhý hlavní komponent přidává 13,05 %. Společně tedy tyto dva hlavní komponenty vysvětlují 99,79 % variability a ostatní komponenty nejsou dále relevantní. U vzorků S70, J65 a J70 je vidět netypické chování křivky. To bylo způsobeno vyloučením vody při stlačování materiálu. Podle obrázku by šlo odhadnout, že u vzorku S70 se vyloučením vody snížil podíl vlhkosti na přibližně 60 %, u vzorku J65 na přibližně 60 % a u vzorku J70 na přibližně 55 %.



Obr. 22: Analýza hlavních komponent (PCA) dielektrických vlastností smrku

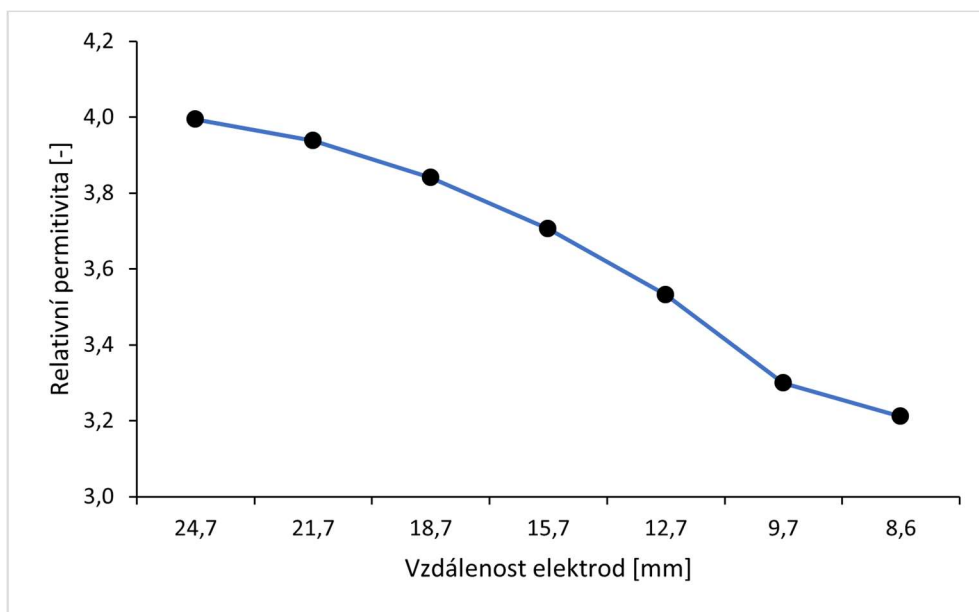


Obr. 23: Analýza hlavních komponent (PCA) dielektrických vlastností jasanu

Z analýzy hlavních komponent je zřejmé, že jednotlivé vzorky štěpky, které se liší na obrázku barvou, tvoří křivky, které se tvarem opakují. Nejvíce zřetelné to je u vzorků jasanu do vzorku J6B. Z obrázku lze také vyčíst, že s rostoucím podílem vlhkosti se křivky posouvají doleva po ose PC1. Jednotlivé body lze od sebe také snadno odlišit, jelikož s rostoucí objemovou hmotností se body posouvají nahoru po ose PC2. Jednotlivé vzorky jasanu lze od sebe snadno odlišit, protože jejich křivky jsou od sebe oddělené a snadno čitelné. Vzorky smrku jsou na sebe nahuštěné a pouze vzorky s vyšším podílem vlhkosti jsou čitelné.

Na základě grafu z Obr. 21 lze určit, že by mohla stačit změřená data relativní permitivity pouze jedné frekvence. U ztrátového faktoru by mohla stačit data jedné nižší frekvence (např. 10 kHz) a jedné vyšší (např. 5 MHz). Dále je z analýzy hlavních komponent znatelné, že pro určení podílu vlhkosti nestačí změřit pouze dielektrické vlastnosti, ale je také důležitý druh materiálu. Pro praxi by to znamenalo znát druh materiálu, který je měřen a být obeznámen s jeho dielektrickými vlastnostmi.

U velmi suchých vzorků docházelo při stlačování k mírnému poklesu relativní permitivity, což je v rozporu s očekávaným chováním. Toto chování bylo zapříčiněno zanedbáním okrajového efektu kolem elektrod. Zvláště při větší vzdálenosti elektrod dochází k ovlivnění elektrické kapacity (její zvýšení) a tím i k navýšení hodnot vypočítané relativní permitivity. Při přibližování elektrod se tento vliv snižuje, a proto je i pozorováno snížení permitivity, což je vidět na Obr.24.



Obr. 24: Závislost relativní permitivity na vzdálenosti elektrod při 1 MHz u vzorku SO

Obecně lze říci, že data změřená při vyšších frekvencích budou přesnější. V případě měření elektrické kapacity při nižších frekvencích je měření ovlivněno Maxwell-Wagnerovou (migrační) polarizací a elektrodovou polarizací. Hlavně elektrodová polarizace tady bude důležitá. Na vyšších frekvencích se polarizační efekty snižují a snižuje se tak i chyba měření. Ztrátový faktor může být zase ovlivněn iontovou vodivostí, která obecně klesá se zvyšující se frekvencí [18].

6 Závěr

Dielektrické vlastnosti dřevní štěrky byly měřeny při nízkých frekvencích (10 kHz – 5 MHz) pro rozdílné objemové hmotnosti a podíly vlhkosti. Ukázalo se, že relativní permitivita a ztrátový faktor jsou závislé na podílu vlhkosti, objemové hmotnosti a frekvenci aplikovaného elektrického pole. Podíl vlhkosti měl dominantní vliv na tyto dielektrické vlastnosti. Relativní permitivita a ztrátový faktor se zvyšovaly se zvyšujícím se podílem vlhkosti a objemové hmotnosti, a naopak klesaly s rostoucí frekvencí. Změny relativní permitivity i ztrátového faktoru byly větší při nižších frekvencích než při vyšších.

Dále bylo vyzpozorováno, že měření bylo zatíženo okrajovým efektem elektrod. To způsobilo, že relativní permitivita se u suchých vzorků mírně snižovala s rostoucí objemovou hmotností, což se ale dít nemůže. To ukazuje, že okrajový efekt u měření při nízkých vlhkostech nemůže být zanedbán a měly by být identifikovány jeho účinky a řádně zkorigovány.

Na základě grafů z analýzy hlavních komponent se ukázalo, že stačí pouze jedna frekvence pro měření relativní permitivity a dvě pro měření ztrátového faktoru. Ukázalo se, že druh materiálu může mít velmi významný vliv na dielektrické vlastnosti. Toto chování by mělo být bráno v potaz při podobných experimentech.

V navazující práci by bylo vhodné zaměřit se na měření dalších vzorků. Současná práce se omezuje pouze na analýzu dvou typů dřevních štěpek – dřevěné piliny neobsahující příměsi, včetně kůry. Avšak vzorky s příměsemi by se mohly chovat odlišně a mohly by vykazovat odlišné vlastnosti v analýze hlavních komponent. Je zřejmé, že čisté vzorky vykazují podobné chování, ale je důležité zkoumat i vzorky s příměsemi, abychom získali komplexnější povědomí o chování materiálu.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Směrnice o obnovitelných zdrojích energie* [online]. Rada EU. 2023 [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/press/press-releases/2023/10/09/renewable-energy-council-adopts-new-rules/>
- [2] Dielectric. In: *Encyclopedia Britannica* [online]. 2010 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/dielectric>
- [3] Dielectric Materials. In: *Poper* [online]. 2016 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://eepower.com/capacitor-guide/fundamentals/dielectric-materials/>
- [4] AWATI, Rahul. Dielectric material. In: *TechTarget* [online]. 1999 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/dielectric-material>
- [5] Dielectric Properties. In: *BYJU'S* [online]. 2011 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://byjus.com/physics/dielectric-properties/>
- [6] MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektrotechnické materiály I: Izolanty a dielektrika* [online]. 2016 [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/06.html>
- [7] AWATI, Rahul. Permittivity (electric permittivity). In: *TechTarget* [online]. 1999 [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/permittivity-electric-permittivity>
- [8] ČIČMANEC, P. *Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetismus*. Bratislava: Alfa a SNTL, 1980. ISBN 63-560-80.
- [9] JIRÁK, Josef, Rudolf AUTRATA, Karel LIEDERMANN, Zdenka ROZSÍVALOVÁ a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. *Materiály a technická dokumentace, část: Materiály v elektrotechnice* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011 [cit. 2024-03-07]. Elektronické učební texty.
- [10] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.
- [11] ELLINGSON, Steven W. *Electromagnetics, Volume 2*. Virginia Tech Publishing, 2020. ISBN 9781949373929.
- [12] ORFANIDIS, Sophocles J. *Electromagnetic Waves and Antennas* [online]. 2016 [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ewa-1up.pdf>

- [13] KOCMAN, Vladimír. *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů: Izolanty A*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1972.
- [14] DOREY, Robert. Microstructure–property relationships. *Ceramic Thick Films for MEMS and Microdevices* [online]. Elsevier, 2012, 85-112 [cit. 2024-03-01]. ISBN 9781437778175. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-4377-7817-5.00004-3
- [15] Dielectric Loss. In: *Vedantu.com* [online]. 2014 [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.vedantu.com/physics/dielectric-loss>
- [16] KOUTNÝ, Jaroslav a Ivo VLK. *Elektronika I učebnice*. Olomouc: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, 2009. VYTVOŘENO V RÁMCI PROJEKTU: DIGITÁLNÍ ŠKOLA: ICT VE VÝUCE TECHNICKÝCH PŘEDMĚTŮ, REG. Č. CZ.1.07/1.1.04/01.0137.
- [17] Capacitance. In: *Encyclopedia Britannica* [online]. 2010 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/capacitance>
- [18] LEV, Jakub, Václav KŘEPČÍK, Egidijus ŠARAUSKIS a František KUMHÁLA. Electrical Capacitance Characteristics of Wood Chips at Low Frequency Ranges: A Cheap Tool for Quality Assessment. *Sensors* [online]. 2021, **21**(10) [cit. 2024-02-26]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21103494
- [19] Dielectric Polarization. In: *LibreTexts* [online]. 2008 [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_%28Materials_Science%29/Optical_Properties/Dielectric_Polarization
- [20] PSARRAS, G.C. Fundamentals of Dielectric Theories. *Dielectric Polymer Materials for High-Density Energy Storage* [online]. Elsevier, 2018, 11-57 [cit. 2024-02-27]. ISBN 9780128132159. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-813215-9.00002-6
- [21] ISHAI, Paul Ben, Mark S TALARY, Andreas CADUFF, Evgeniya LEVY a Yuri FELDMAN. Electrode polarization in dielectric measurements: a review. *Measurement Science and Technology* [online]. 2013, 2013-10-01, **24**(10) [cit. 2024-03-08]. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/24/10/102001
- [22] NEUBERGER, Pavel, Daniel ADAMOVSKÝ a Radomír ADAMOVSKÝ. *Termomechanika*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1634-8.
- [23] WEBSTER, John G. *Measurement instrumentation & sensors handbook*. Boca Raton: CRC, 1999. ISBN 978-0849383472.

- [24] KUDLÁČEK, Ivan. *Degradační procesy I*. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 80-010-1098-8.
- [25] TSOUMIS, George Thomas. Wood. In: *Encyklopædia Britannica* [online]. 2010 [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue>
- [26] BLAHOVEC, Jiří. *Zemědělské materiály*. Praha: VŠZ, 1993. ISBN 80-213-0123-6.
- [27] COWN, D.J. Wood: Density. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* [online]. Elsevier, 2001, 9620-9622 [cit. 2024-02-26]. ISBN 9780080431529. Dostupné z: doi:10.1016/B0-08-043152-6/01741-1
- [28] RAHMAN, Abdur, Mohammad MARUFUZZAMAN, Jason STREET, James WOOTEN, Veera Gnaneswar GUDE, Randy BUCHANAN a Haifeng WANG. A comprehensive review on wood chip moisture content assessment and prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2024, **189** [cit. 2024-03-10]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2023.113843
- [29] MCMILLEN, John. M. *Methods of Determining the Moisture Content of Wood*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1956.
- [30] FETZER, W. R. Determination of Moisture by Distillation. *Analytical Chemistry* [online]. 1951, 1951-08-17, **23**(8), 1062-1069 [cit. 2024-03-10]. ISSN 0003-2700. Dostupné z: doi:10.1021/ac60056a004
- [31] DIETSCH, Philipp, Steffen FRANKE, Bettina FRANKE, Andreas GAMPER a Stefan WINTER. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* [online]. 2015, **5**(2), 115-127 [cit. 2024-03-11]. ISSN 2190-5452. Dostupné z: doi:10.1007/s13349-014-0082-7
- [32] NYSTRÖM, J. a E. DAHLQUIST. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants—a review. *Fuel* [online]. 2004, **83**(7-8), 773-779 [cit. 2024-03-11]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2003.11.002
- [33] PAN, Pengmin, Timothy P. MCDONALD, Brian K. VIA, John P. FULTON a John Y. HUNG. Predicting moisture content of chipped pine samples with a multi-electrode capacitance sensor. *Biosystems Engineering* [online]. 2016, **145**, 1-9 [cit. 2024-03-11]. ISSN 15375110. Dostupné z: doi:10.1016/j.biosystemseng.2015.12.005
- [34] SEBERA, Martin. *Statistika - vícerozměrné metody*. Brno: Masarykova univerzita, 2014. ISBN 978-802-1066-922.