

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Technická fakulta

## **Měření elektrických vlastností dřevní štěpky**

Diplomová práce



Vedoucí diplomové práce: Prof. Dr. Ing. František Kumhála

Autor práce: Bc. Marek Hofman

PRAHA 2017

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Marek Hofman

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Měření elektrických vlastností dřevní štěpky.**

Název anglicky

**The measurement of wooden chips electric properties**

---

### Cíle práce

Na nově vyvinutém přístroji naměřit elektrické vlastnosti různých typů dřevní štěpky. Vyhodnotit funkci přístroje a porovnat naměřené dielektrické vlastnosti.

### Metodika

Studium literatury zaměřené na dřevní štěpku a její vlastnosti. Pomoc při výrobě a zprovoznění měřící aparatury pro měření elektrických vlastností dřevní štěpky. Vlastní laboratorní měření zaměřené na ověření funkčnosti měřící aparatury a posléze na měření elektrických vlastností různých typů dřevní štěpky. Vyhodnocení naměřených hodnot, formulace závěrů a doporučení pro další práci.

Doporučená osnova práce:

1. Úvod.
2. Literární rešerše zaměřená na dřevní štěpku a elektrické vlastnosti dřeva.
3. Konstrukce měřící aparatury, metodika měření.
4. Laboratorní měření různých typů dřevní štěpky.
5. Vyhodnocení výsledků měření, diskuse.
6. Závěr.

**Doporučený rozsah práce**

40 až 60 stran

**Klíčová slova**

dřevo, elektrické vlastnosti, dřevní štěpka

---

**Doporučené zdroje informací**

- NELSON, S. O. 2005. Dielectric Properties Measurement for Agricultural Applications. ASAE Paper No: 053134.
- NYSTRÖM, J. 2006. Rapid measurements of the moisture content in biofuel. PhD thesis, Mälardalen University.
- NYSTRÖM, J. – DAHLQUIST, E. 2004. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants – a review. Fuel, Vol. 83, pp.
- SACILIK, K. – COLAK, A. 2010. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. Powder Technology, Vol. 203, pp. 365–370.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2016/17 LS – TF

**Vedoucí práce**

prof. Dr. Ing. František Kumhála

**Garantující pracoviště**

Katedra zemědělských strojů

**Konzultant**

Ing. Václav Křepčík

---

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2016

**prof. Dr. Ing. František Kumhála**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2016

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 27. 10. 2016

---

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem Diplomovou práci na téma „Měření elektrických vlastností dřevní štěpky“ vypracoval samostatně pod odborným vedením Prof. Dr. Ing. Františka Kumháli a s použitím odborné literatury a pramenů citovaných v příloze použitá literatura.

V Praze: .....

.....

Marek Hofman

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu mé práce Prof. Dr. Ing. Františku Kumhálovi za zájem, připomínky a čas, který věnoval mé práci. Dále bych rád poděkoval Ing. Václavu Křepčíkovi za cenné rady a pomoc při řešení problémů.

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je na nově vyvinutém přístroji naměřit elektrické vlastnosti různých typů dřevní štěpky. Vyhodnotit funkci přístroje a porovnat naměřené dielektrické vlastnosti. V úvodní části je vysvětlen pojem dřevní štěpka, způsob její výroby a využití. Následně jsou v první části práce popsány parametry charakterizující dřevní štěpku a jejich význam při využití štěpky. Druhá část se skládá z přehledu metod pro zjištění hodnot parametrů uvedených v první části. Následuje vlastní laboratorní měření zaměřené na ověření funkčnosti měřicí aparatury a posléze na měření elektrických vlastností různých typů dřevní štěpky. Závěrem je vyhodnocení naměřených hodnot a formulace závěrů.

**Klíčová slova:** dřevo, elektrické vlastnosti, dřevní štěpka

### **The measurement of wooden chips electric properties**

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to measure the electrical properties of different types of wood chips on the newly developed device. Evaluate the function of the instrument and compare the measured dielectric properties. The introductory part explains the concept of wood chips, method for its manufacturing and use. The first part describes the parameters characterizing wood chips and their role in the use of wood chips. The second part contains an overview of the methods for determining the parameter values listed in the first section. This is followed by laboratory measurements aimed at verifying the functionality of measuring instrument and subsequently measuring the electrical properties of different types of wood chips. The conclusion is the evaluation of measured values and formulation of conclusions.

**Keywords:** wood, electric properties, wood chips

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Dřevní štěpka.....	2
2.1	Základní třídění štěpek .....	2
2.1.1	Zelená štěpka.....	2
2.1.2	Hnědá štěpka.....	3
2.1.3	Bílá štěpka .....	3
2.2	Původ štěpkovaného materiálu .....	4
2.2.1	Zbytky z lesní těžby.....	4
2.2.2	Rychle rostoucí dřeviny .....	4
2.2.3	Odpad z dřevozpracujícího průmyslu .....	6
2.3	Technologie štěpkování.....	6
2.3.1	Štěpkovače .....	7
2.3.2	Drtiče .....	10
2.4	Využití štěpky.....	11
2.5	Chemické složení dřeva .....	12
2.5.1	Voda.....	12
2.5.2	Těkavé látky .....	13
2.5.3	Pevný uhlík .....	13
2.5.4	Popel.....	13
2.6	Elektrické vlastnosti dřeva.....	15
2.6.1	Vodivost elektrického proudu .....	15
2.6.2	Elektrická pevnost dřeva .....	15
2.6.3	Piezoelektrické vlastnosti dřeva .....	15
2.6.4	Permitivita dřeva .....	16
2.7	Sledované parametry dřevní štěpky.....	16
2.7.1	Vlhkost.....	17
2.7.2	Výhřevnost.....	19
2.7.3	Sypná hmotnost.....	21
2.7.4	Velikost štěpek .....	21
2.7.5	Teplota tání popelovin a spékání popele .....	22
3	Metody pro měření parametrů dřevní hmoty .....	23
3.1	Metody zjišťování vlhkosti dřeva.....	23
3.1.1	Přímé metody .....	23

3.1.2	Nepřímé metody .....	25
3.2	Metody zjišťování výhřevnosti dřeva .....	30
3.3	Stanovení množství těkavých látek .....	31
3.4	Zjišťování velikosti a podílu frakcí .....	32
3.5	Zjišťování obsahu kůry ve štěpce .....	32
4	Cíl práce .....	34
5	Konstrukce měřící aparatury a metodika měření.....	35
5.1	Metodika měření.....	35
5.2	Měřící aparatura.....	35
5.2.1	Digitální teploměr Greisinger GTH 175/Pt .....	35
5.2.2	Laboratorní síťový prosévač Haver EML DP .....	36
5.2.3	Váha Ohaus CD - 11 .....	36
5.2.4	Aparatura pro měření elektrických vlastností.....	37
5.2.5	GW Instek LCR-8110G.....	37
5.2.6	Sušicí pec Memmert typ UFB500 .....	38
5.3	Metodika ekonomického zhodnocení .....	39
6	Postup laboratorního měření .....	39
7	Vyhodnocení výsledků měření .....	40
7.1	Měření elektrických vlastností dřevní štěpky.....	40
7.2	Ekonomické zhodnocení.....	46
8	Závěr .....	50
9	Použitá literatura.....	51
10	Přílohy.....	52
10.1	Seznam obrázků .....	52
10.2	Seznam tabulek .....	53



# 1 Úvod

V dnešní době je snaha všechno ekonomicky zužitkovat, a proto s nástupem mechanizované techniky se začalo uvažovat i o využití dendromasy, která byla likvidována pálením a tento způsob likvidace byli jenom další náklady bez zisků. Začaly se vyrábět stroje, které byly schopny zpracovat dendromasu na malé části, které nazýváme štěpky.

Dřevní štěpka je v současné době cenným energetickým zdrojem a její využívání pro vytápění a výrobu elektrické energie v současné době narůstá. Před provozovateli vytopen však zůstává otázka kvality využívané dřevní štěpky, a tudíž i její reálné energetické hodnoty. Hlavním ukazatelem kvality paliva je jeho výhřevnost. Výhřevnost je přímo závislá na vlhkosti paliva. Je mnoho způsobů, jak zjistit vlhkost dřevní štěpky, ale přesné metody měření jsou časově náročné, a proto je snaha o minimalizování času potřebného ke zjištění vlhkosti paliva. Tato práce se zabývá touto problematikou a zaměřuje se na metody využívající k měření vlhkosti paliva elektrických vlastností dřeva a vody.

Tabulka 1: Vícekriteriální porovnání paliv metodou pořadí

Palivo	Kritéria					$\sum v \cdot k$	Pořadí
	Výhřevnost	Výroba	Emise	Popel	Cena		
Černé uhlí	2	4	4	3	4	3,2	4.
Dřevní štěpka	4	2	2	1	2	2,4	1.
Hnědé uhlí	3	3	5	4	3	3,6	5.
Koks	1	5	3	2	5	2,8	2.
Sláma obilná	5	1	1	5	1	3	3.
<b>Váhy</b>	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2		

Zdroj: Autor

$v$  – Váhy kritéria

$k$  – Kritérium

V tabulce 1 bylo vybráno pět kritérií pro porovnání pěti druhů paliv. Každé palivo je pro jednotlivá kritéria ohodnoceno čísly 1-5, kde 1 je nejlepší a 5 nejhorší. Každému kritériu je přiřazena váha kritéria a součet všech vah se musí rovnat 1.

## **2 Dřevní štěpka**

Strojně nasekaná nebo nadrcená dřevní hmota se nazývá dřevní štěpka. Velikost částic zpracované dřevní hmoty se pohybuje o délce od 3 do 250 mm. Biomasa použitá k výrobě dřevní štěpky může být ze zbytků lesní těžby, z cíleně pěstovaných rychle rostoucích dřevin nebo průmyslového zpracování dřeva. Slouží pro výrobu elektrické energie nebo jako palivo pro ekologický a levný způsob vytápění.

Dřevní štěpka je jedním z biopaliv, a proto se jedná o 100 % obnovitelný zdroj energie. Při výrobě dřevní štěpky není zapotřebí žádné další vynaložené energie na její úpravu (například sušení, lisování), proto jde o velmi levné biopalivo. Výhřevnost vysušené dřevní štěpky lze přirovnat k hnědému uhlí. (Hofman, 2015)

### **2.1 Základní třídění štěpek**

Velký vliv na vlastnost paliva má množství přítomných cizích částic v dřevní štěpce a její celkové složení. Složení dřevní štěpky může obsahovat plody, kůru, nebo může obsahovat cizí částice (například zeminu). Zároveň se může dřevní štěpka skládat z jednoho, či více druhů dřevin. Počet druhů dřevin obsažených v biomase závisí na zastoupení jednotlivých druhů dřevin v káceném porostu.

#### **2.1.1 Zelená štěpka**

Zelené štěpce se též říká lesní štěpka. Tato štěpka je získávána zpracováním lesních těžebních zbytků, cíleně pěstovaných rychle rostoucích dřevin, nebo z dřeviny pokácené při kultivačním zásahu. Štěpka se vyrábí drcením celé surové dendromasy (nebo celých dřevin), proto tato štěpka může obsahovat mimo kůry a dřeviny i nečistoty a asimilační orgány.

Jelikož je lesní štěpka ze surového dřeva, má vysoký obsah živin a také vysoký obsah vlhkosti (až 60 % vlhkosti). Toto prostředí vytváří vhodné podmínky pro množení mikroorganismů, které zahřívají štěpku a vyvolávají hnilobné procesy. V nevyhovujících podmínkách mohou tyto procesy vést až k samovznícení štěpky. Proto je důležité nechat štěpku proschnout (do 30 % vlhkosti bude vysychat rychle i při sušení na sluníčku) a skladovat v suchých místech, kde bude mít přístup vzduchu a bude chráněná před dalšími vlivy způsobujícími vlhnutí (například před deštěm). (Stupavský, Holý, 2010)

### **2.1.2 Hnědá štěpka**

Hnědá štěpka se na rozdíl od zelené štěpky skládá ze dřeva a kůry bez asimilačních orgánů (jehličí, listí). Vstupním materiálem z lesního porostu může být například starší klest z lesních těžeb a drobný listnatý klest bez asimilačních orgánů. Dalším zdrojem vstupního materiálu jsou odřezky z průmyslového zpracování dřeva, zpravidla krajiny z pilařských provozů, ve kterých není vyřešeno odkornění před vlastním požezem. Z důvodu nižší vlhkosti a tím také vyšší výhřevnosti, je tato štěpka vhodná pro energetické využití. Zároveň nižší vlhkost materiálu umožňuje delší dobu skladování bez výraznější ztráty kvality. Hnědá štěpka se využívá k technickým účelům (například výroba dřevodesek). K energetickým účelům se používá převážně hnědá štěpka horší kvality (pokud je poptávka po technickém využití vyšší než po využití energetickém). (Stupavský, Holý, 2010)

### **2.1.3 Bílá štěpka**

Bílá štěpka se vyrábí pouze štěpkováním materiálu z odkorněné dřevní hmoty (obvykle z odřezků na pilařských závodech) za účelem dalšího zpracování v celulózo-papírenském průmyslu. Tato štěpka je čistá dřevní hmota a používá se výhradně k technickým účelům (například v papírnictví, uzenářství). Vzhledem k technologické náročnosti se předpokládá vyšší zhodnocení tohoto materiálu, proto tento zdroj je zřídka využíván pro energetické využití. (Stupavský, Holý, 2010)

## **2.2 Původ štěpkovaného materiálu**

### **2.2.1 Zbytky z lesní těžby**

Při těžbě kulatiny (surové kmeny s průměrem nad 7 cm, odborně hroubí) v lesním porostu vznikají těžební zbytky. Jako těžební zbytky se berou ty části stromů, které nejsou cílem těžby, a to jsou větve a stromové vršky s průměrem do 7 cm (odborně nehroubí). Pokud by se těžební zbytky nechaly ležet na pasece, bránili by v růstu další generaci lesa. Z tohoto důvodu lesní zákon č. 289/1995 Sb. požaduje po vlastníkově, aby zajistil „vyčištění“ paseky pro přirozenou obnovu nebo nové sazenice. Dříve se nehroubí na pasekách ukládalo na hromady a pálilo. Tímto způsobem vlastníkově vznikali další náklady bez možnosti zisku. Později se začalo nehroubí zpracovávat na dřevní štěpku a prodávat jako obnovitelný zdroj energie.

Dendromasa se skládá z částí stromů, které nebyly využity při těžebním zpracování a z těžebního odpadu. Při těžbě se nezpracovává nehroubí, což jsou větve a vršky stromů o průměru menším než 70 mm. Dále po těžbě zůstávají různé odřezky (zarovnávací pařezů, kmenů).

Při vlečení dříví dochází k jeho znečištění, a to způsobuje problémy při jeho štěpkování. Z tohoto důvodu je lepší používat vyvážecí soupravy, nebo zpracovávat a štěpkovat dendromasu na místě, pokud je to možné. (Hofman, 2015)

### **2.2.2 Rychle rostoucí dřeviny**

Cíleně pěstovaná rychle rostoucí dřevina, z níž se vyrábí dřevní štěpka, se pěstuje na takzvaných výmladkových plantážích. Dřeviny pěstované za tímto účelem jsou měkké energetické dřeviny a převážně se jedná o dva druhy dřeviny. Prvním druhem je rychle rostoucí (japonský) topol a druhou dřevinou je vrba. Výhodou rychle rostoucích topolů je rychlost růstu po seříznutí a vysoký výnos nadzemní části dřeviny v krátkém čase. Sklizeň topolu je zhruba jednou za tři roky. Topolové plantáže mají životnost až 20 let, takže při dobrých podmínkách je možno dosáhnout i 7 sklizní s celkovým výnosem až 90 t.ha<sup>-1</sup>. Rychle rostoucí topol je vhodný pro pěstování na většině území střední a východní Evropy, protože je nenáročný na podmínky a daří se mu až do nadmořské výšky 600 m. (Hofman, 2015)

Většina druhů rychle rostoucích dřevin pěstovaných pro produkci dřevní štěpky ve výmladkových plantážích na zemědělské půdě se řadí k nepůvodním druhům nebo jejich křížencům. Jejich pěstování je limitováno zákonem o ochraně přírody a krajiny č. 114/92 Sb., který zakazuje použití geograficky nepůvodních druhů ve zvláště chráněných územích a podmiňuje jejich pěstování v ostatní krajině souhlasem orgánu ochrany přírody.

### **Topol Japonský**

Japonský topol je palivo bilančně neutrální s ohledem na emise CO<sub>2</sub>. Při spálení 1 t dřevní hmoty je spotřeba kyslíku 1,2 t a emise CO<sub>2</sub> 1,6 t. Pro vzrůst 1 t dřevní hmoty na ploše 0,21 ha se rovněž spotřebuje 1,6 t CO<sub>2</sub>, a tak se stává jeho bilance vůči spalování neutrální a vyrovnaná (na rozdíl od všech jiných paliv). Štěpka z japonského topolu je vhodná jak pro přímé spalování, tak i pro další zpracování na pelety nebo brikety. Optimální cyklus sklizně je 2-4 roky podle možností pěstitele (mechanizace 2 až 3 roky) na ideální lokalitě lze za uvedené období dosáhnout hektarového výnosu 60 - 100 tun surové štěpky při 55 % vlhkosti. (RRD, 2018)

### **Vrby**

Vrby rostou téměř po celém světě, hlavně v místech s dostatkem vody a světla, při splnění těchto podmínek osidlují téměř všechny biotopy. Rostou v mírném a chladném pásmu, vyskytují se však i za polárním kruhem a v subtropích. Vyrůstají na navážkách, opuštěných loukách, pastvinách i orné půdě, v lomech, železničních náspech. Místo původního výskytu tohoto rodu je pravděpodobně v horách východní Asie.

Vrby jsou opadavé dvoudomé stromy nebo keře s mohutným kořenovým systémem, mohou být plazivé nebo růst vzpřímeně, jejich větve jsou převislé nebo vzpřímené. Pupeny mají zpravidla jednu šupinu (šupina chrání pupen), jen vzácně dvě. Listy jsou jednoduché, celistvé, většinou mají krátký řapík a palisty. Listové čepele bývají tvaru čárkovitého, okraje mají zubaté nebo celokrajné.

Vrbové dřevo je měkké a pórovité. Listy vrb společně s mladými výhonky slouží i jako potrava pro dobytek. Vrba vykvétá brzy z jara a je významnou medonosnou rostlinou. Pro snadné zakořeňování poléhavých větví a keřovitý vzrůst se vrby používají ke stabilizaci břehů vodních toků a nádrží. Pro svůj vzhled se vysazují jako okrasné dřeviny v parcích a jako rychle rostoucí dřevina se využívá pro produkci biomasy k energetickým účelům.

Rod vrba je velice široký skládá se asi ze 450 druhů, názory na počet jsou však dosti odlišné.

Na území České republiky se vyskytuje několik domácích druhů vrb vhodných pro výmladkové pěstování na zemědělské půdě, které jsou využívány na výrobní dřevní štěpky k energetickému, případně průmyslovému využití. Mezi nejlépe rostoucí patří klony příp. odrůdy domácích vrb, z nichž některé dosahovaly srovnatelného výnosu jako zahraniční odrůdy vrb případně topolů. V České republice je 10 původních druhů vrb. (RRD, 2018)

Tabulka 2: Roční přírůstek sušiny – Topol

Výnos $t_{suš.} \cdot ha^{-1}$	Tříletý cyklus	Šestiletý cyklus
Celkem	187	254
Roční přírůstek	15,6	21,2

Zdroj: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/topoly-a-vrby-pro-energetiku>

Tabulka 3: Roční přírůstek sušiny – vrba

Výnos $t_{suš.} \cdot ha^{-1}$	Tříletý cyklus	Šestiletý cyklus
Celkem	121	107
Roční přírůstek	10,1	8,9

Zdroj: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/topoly-a-vrby-pro-energetiku>

### 2.2.3 Odpad z dřevozpracujícího průmyslu

Dalším zdrojem biomasy pro štěpkování je dřevní odpad z dřevozpracujícího průmyslu. Štěpka vyrobená zpracováním odpadu může mít tu výhodu, že se v ní nevyskytují nečistoty a může být i zbavena kůry. Kůra má o trochu vyšší výhřevnost než dřevo, ale zároveň obsahuje vyšší množství emisních látek. U štěpky z dřevozpracujícího průmyslu musíme hlavně dbát na to z jaký výrobní odpad se jedná, protože v odpadu mohou být i různé příměsi (například lepidla), které obsahují látky znečišťující ovzduší. (Hofman, 2015)

## 2.3 Technologie štěpkování

Štěpky se z dřevní dendromasy vyrábějí za pomoci štěpkovacích, nebo drtících zařízení. Tyto zařízení mohou být stacionární anebo mobilní. V případě stacionárních zařízení je potřeba ještě dendromasa z lesa dovážet na místo, kde je zařízení umístěno.

### 2.3.1 Štěpkovače

Štěpkovače jsou stroje, u kterých při práci dochází k beztržskému dělení dřeva. Pracovním nástrojem štěpkovače jsou sekací nože, které jejich řezným účinkem dělí dřevní hmotu na malé částice o požadované velikosti. Nože dělí dřevo napříč vlákny a zároveň dělí dřevní hmotu na potřebnou tloušťku podél vláken díky klínovému tvaru nožů. Podle sekacího ústrojí dělíme štěpkovače na šroubové, bubnové a diskové. (Hofman, 2015)

Obrázek 1: Dřevní štěpka nasekaná nožovým štěpkovačem



Zdroj: Stupavský, Holý, 2010

#### **Diskové štěpkovače**

Diskové štěpkovače jsou díky jejich vysokým výkonům nejrozšířenějším strojem na výrobu štěpky. Ze začátku se vyráběly jen stacionární štěpkovače s počtem nožů od 2 do 16, průměrem disku od 1000 do 2000 mm, a instalovaným výkonem až 500 kW. Konstrukce štěpkovače byla řešená tak, že dřevo vkládané do stroje klouže šikmo po žlabu k rotoru štěpkovače. Při zpracování rovnaného dříví nebo krácených stromů o délce 2 až 4 m měli tyto štěpkovače výkonnost 200 až 300 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. (Hofman, 2015)

Později stacionární štěpkovače začali nahrazovat pojízdné štěpkovače. Tyto štěpkovače byly upraveny, aby byly schopny zpracovat na štěpku i celé stromy. V dnešní době se vyrábějí pojízdné diskové štěpkovače dvojího provedení:

### **Štěpkovače s rovinou sekání skloněnou pod úhel $\alpha$ k ose dopravníku.**

Konstrukce sekacího zařízení tohoto typu štěpkovače je řešena tak, že síla potřebná ke vtahování dřeva k sekacímu rotoru je vyvolávána přímo sekacími noži. Tato síla pro vtahování dřeva má velký význam při vtahování a formování koruny stromů podávacím zařízením. Nevýhodou tohoto typu štěpkovače je, že je potřeba používat převodovku na překonání úhlu  $\alpha$  a uložení podávacího zařízení vychází velmi vysoko. (Hofman, 2015)

### **Štěpkovače s kolmou rovinou sekání na osu dopravníku a pootočenou k ose dopravníku o úhel $\beta$ .**

Konstrukce tohoto typu pojízdných štěpkovače umožňuje zmenšit celkovou výšku podávacího zařízení i při velkých průměrech sekacího disku za předpokladu, že sekání probíhá ve spodní části disku. Oproti předešlému provedení je pohon celého zařízení jednodušší, protože spalovací motor je uložen vodorovně a úhel  $\beta$  je vytvořen v horizontální poloze. Nevýhodou tohoto typu konstrukce je, že musí být vybaveno vertikálními podávacími válci, které zachytí účinek sekacích nožů na vtažovací dopravník a protinůž musí být řešen v rovině horizontální i vertikální. (Hofman, 2015)

Mezi výhody diskových štěpkovačů patří tyto:

- Pojízdné diskové štěpkovače mají vysokou kvalitu štěpky a vyrovnají se štěpkovačům stacionárním.
- Umožní štěpkovat dřevo při přijatelném hmotnostním i pevnostním dimenzování až do průměru 500 mm.
- Díky velké setrvačnosti mohou mít spalovací motory o menším výkonu.
- Disky vyvinou velkou trhací i ventilační sílu, a tak není potřeba zvláštní ventilátor.

Nevýhodou diskových štěpkovačů je, že průměr vstupního otvoru je omezený poloměrem sekacího disku a není vhodné pro sekání chaotického materiálu (materiál by se měl podávat kmenem napřed).



### **Bubnové štěpkovače**

Na rozdíl od diskových štěpkovačů, bubnové štěpkovače jsou vhodné na zpracování chaotického materiálu o menších rozměrech. Sekací nože jsou uloženy v rotujícím válci po celém jeho obvodu. Počet nožů v bubnu může být od 2 do 20 nožů o rozměrech od 450 do 1120 mm. (Hofman, 2015)

Bubnové štěpkovače mají tyto výhody:

- Díky menšímu sekacímu ústrojí je možné lépe řešit rozložení celého agregátu na podvozku.
- Horizontální uložení osy bubnu umožňuje oproti diskovým štěpkovačům výhodnější řešení celkového pohonu bez nutnosti kuželové převodovky.
- Je možné řešit vstupní dopravník níže než u štěpkovačů diskových.
- Nezáleží na směru podávaného materiálu.

Nevýhody bubnových štěpkovačů:

- Díky nízkému setrvačnému výkonu nejsou vhodné pro sekání dřeva většího průměru.
- Tloušťka štěpky velmi kolísá.
- Nízký ventilační a téměř nulový vrhací účinek.
- Nutnost montovat přídatný ventilátor.
- Je zapotřebí použít motor o vyšším výkonu.

### **Šroubové štěpkovače**

Šroubové štěpkovače mají jenom jeden účel, a to štěpkování tenkých stromků o velikosti 60-80 mm. Řezacím orgánem je šroubovice se stoupajícím průměrem. Šroubovice se svým rotačním pohybem zařezává do dřeva a zároveň vtahuje dřevo směrem dovnitř k větším průměrům šroubovice.

Výhoda šroubového štěpkovače spočívá v malém množství jemných fragmentů vznikajících při štěpkovacím procesu, a to i při použití materiálu s velkým množstvím kůry z údržby veřejné zeleně nebo z plantáží rychle rostoucích dřevin. (Hofman, 2015)

### 2.3.2 Drtiče

Drtiče mají převážně využití při zpracování dendromasa, kterou není možné zpracovat štěpkovače. Jedná se o netvárné nebo mimořádně znečištěné drobné dřeviny. Při mechanizovaným shrnováním na pasekách dochází k znečištění klestu. Znečištění se mezi vlastní biomasu dostává značným množstvím nečistot (zejména písku, hlíny a kamenů či jiných tvrdých předmětů). Kvůli tomuto znečištění dochází k poškozování ostrých nožů štěpkovačů a je nutná jejich častá výměna. Proto je znečištěná dendromasa pro štěpkovače limitujícím faktorem. Z tohoto důvodu jsou štěpkovače v některých technologických postupech nahrazovány drtiči, jež mají místo nožů jako pracovní nástroj pevně, nebo pohyblivě umístěná kladiva na rotoru. Kladiva umístěná pohyblivě na rotoru mají oproti pevně uloženým kladivům tu výhodu, že při nárazu na tvrdý předmět mění svou polohu a díky tomu snižují riziko poškození kladiv. Kladiva jsou opatřena výměnnými hranami, nebo mohou být speciálně tvarována pro drcení bez ostrých ploch. Drtiče jsou umístěny na samostatných pásových podvozcích nebo na návěsných, přívěsných kolových podvozcích, které jim dovolují se pohybovat přímo v terénu. Jedná se o stroje robustní konstrukce na kolovém nebo samostatném pásovém podvozku, které jsou větší a těžší než štěpkovače.

Obrázek 2: Dřevní štěpka nadrcená kladivovým drtičem



Zdroj: Stupavský, Holý, 2010

Vlastní drcení probíhá účinkem kladiv na rotoru. Za rotorem s kladivy je obvykle umístěn třídící (dodrcovací) koš, určující velikost výsledné frakce. Teoretický výkon drtičů se pohybuje v horní hranici až okolo 450 m<sup>3</sup>/h. Podle počtu otáček za minutu dělíme drtiče na nízkootáčkové a vysokootáčkové. (Hofman, 2015)

**Nízkootáčkové drtiče** mají použití převážně k drcení rozměrově nehomogenního odpadu z truhlářské výroby. Pohyblivým pracujícím orgánem je většinou válec s tvarově rozdílnými kladivky, která jsou po jeho obvodu rozmístěna spirálově. Protinůž se tvaruje podle tvaru kladívek. Další rozdělení tohoto typu drtiče je podle počtu válců na jednoválcové a dvou válcové.

Výhodou dvouválcových drtičů s rotací válců proti sobě je, že nemusí mít ve výbavě protinůž. Tyto drtiče nejsou příliš vhodné k homogenizaci dendromasy. Na zpracování lesní dendromasy jsou vhodnější **vysokootáčkové drtiče**. (Hofman, 2015)

**Bubnové vysokootáčkové drtiče** mají pracovní orgán vybavený kladívky, nebo spirálově rozmístěnými noži. Drtiče vybavené kladívky jsou vhodné pro drcení tenkých větví, kůry, křovin a podobných materiálů. Drtiče se spirálově rozmístěnými noži jsou vhodné pro drcení větví, kusového odpadu apod. (Hofman, 2015)

Tabulka 4: Výhody a nevýhody mobilních drtičů ve srovnání se štěpkovači

Výhody	Nevýhody
Vyšší odolnost dělicího agregátu	Vysoká cena
Vysoký výkon	Vysoká hmotnost
Možnost podávání i čelním nakladačem	Konstrukční složitost
Možnost drtit i materiál s příměsí železa	Rozměrově různorodý příměsový materiál

Zdroj: Hofman, 2015

## 2.4 Využití štěpky

Dřevní štěpka slouží jako biomasa pro výrobu elektrické nebo tepelné energie. V kogeneračních zařízeních lze produkovat teplo i elektřinu zároveň. Největší využití dřevní štěpky je zejména ve výkonnějších kotlích k vytápění větších budov, nebo se spaluje spolu s uhlím v klasických elektrárnách. Štěpka se nemusí přímo spalovat v sypkém stavu, ale může se dále zpracovávat pomocí lisů na brikety a pelety. Díky tomu hmota získá tvar a minimalizuje se mezerovitost.

V kotlích speciálně upravených na spalování dřevní štěpky je možno spalovat volně loženou, nestlačenou dřevní štěpku zpracovanou na drobno pomocí drtiče nebo štěpkovače z dendromasy, pil, apod. O hrubosti štěpky rozhoduje velikost a výkon kotle a doporučení výrobce. Dle doporučení výrobce lze použít hrubší štěpku zpracovanou pomocí kladivových drtičů nebo jemnější štěpku vyrobenou pomocí nožových štěpkovačů.

Dalším využitím dřevěné štěpky je při výrobě papíru a celulózy. Pro truhlářské využití se z dřevařské štěpky (rozdrcené odřezky) a pilin dá po dalším zpracování vyrobit dřevovláknitá nebo dřevotřísková deska. V malém množství se štěpka též využívá jako zahradní **mulč**. Výhodou dřevní štěpky na rozdíl od mulčovací kůry je, že štěpka má vyšší estetickou úroveň i trvanlivost. Takto využívají dřevní štěpku třeba zahradnické společnosti. (Hofman, 2015)

## 2.5 Chemické složení dřeva

Živý strom má zhruba polovinu své hmotnosti tvořenou v sušině, která se skládá z mnoha látek. Druhá polovina hmotnosti stromu je tvořena vodou. V sušině obsažené látky můžeme rozdělit podle hoření na látky spalitelné a nespalitelné. Spalitelné látky se dělí dle skupenství na těkavé látky a látky spalované v pevném stavu. Sušina je zhruba z 85 % tvořena z těkavých látek (C, N, H, O, S), které nehoří přímo na roštu, ale v prostoru mezi roštem a komínem. Látky spalované v pevném stavu na roštu (zejména C) tvoří zhruba 14 % sušiny a nespalitelné látky (popel) tvoří zbytek obsahu sušiny. (Hofman, 2015)

Tabulka 5: Poměrná množství prvků v sušině tuzemského dřeva

Složka	C	H	O	N	popel
<b>Zastoupení v %</b>	50	6	43	0,04-0,2	0,2-0,6

Zdroj: Hofman, 2015

### 2.5.1 Voda

Obsah vody v čerstvém dřevě může být i nad 50 % vody. Když při spalovacím procesu dojde k překonání bodu varu (teploty 100 °C), voda se začne z paliva rychle odpařovat a přeměňovat se na vodní páru. Odpařování vody způsobí, že výhřevnost paliva je snížena o energii, která je potřebná k odpaření vody obsažené v palivu. Na odpaření 1 kg vody je potřeba 2,44 MJ tepla. (Hofman, 2015)

### **2.5.2 Těkavé látky**

Při teplotě 100 – 105 °C v průběhu hoření dochází k uvolňování látek, které v důsledku oxidace mění své skupenství na plynné. Teplota potřebná ke vzplanutí je u měkkých dřevin od 220 °C a u tvrdých dřevin až od 300 °C. (Hofman, 2015)

Z dřevní štěpky při oxidaci hořlavin vznikají především plynné látky CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. Další látky vznikající při oxidaci hořlavin jsou považovány za látky znečišťující. Vznik těchto látek závisí na sloučeninách obsažených ve dřevě a na podmínkách a průběhu spalovacího procesu. Při špatném způsobu spalování paliva vzniká oxid uhelnatý (CO). Vzniku jeho emisí zabráníme dostatečnou teplotou spalování a dostatečným přístupem vzduchu (oxiduje na CO<sub>2</sub>).

V malém množství se jako další prvek obsažený v dřevní hmotě vyskytuje dusík (N), který v důsledku hoření oxiduje na Nox. Obsah dusíku závisí na konkrétním druhu dřeviny. Velkou předností při spalování dřevní hmoty je, že obsahuje minimální množství síry, a proto je produkování SO<sub>2</sub> minimální.

Obecně platí, že čím je biopalivo mladší, tím má vyšší podíl těkavých látek. Jev známý jako „dlouhý plamen“, je způsobovaný vysokým podílem těchto těkavých látek, uvolňovaných v počáteční fázi hoření. (Hofman, 2015)

### **2.5.3 Pevný uhlík**

V pevném stavu zůstává na roštu zejména uhlík, který se při teplotě 800 – 900 °C povrchově okysličuje na oxid uhelnatý (CO) a ten se následně, pokud je dostatek přístupu vzduchu, oxiduje na oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>). (Hofman, 2015)

### **2.5.4 Popel**

Složení emisních plynů vypouštěných do ovzduší, palivovou výhřevnost, konstrukci spalovacích kotlů a další možnosti zpracování, či využití popele z biopaliv ovlivňuje zejména podíl jednotlivých prvků v popelu.

Při růstu se v dřevinách ukládají nespalitelné látky. Živiny přijímá strom díky kořenovému systému, včetně minerálních látek z půdy. Všechny živiny jsou pak mízním tokem dopraveny do kmene a koruny stromu. Množství a velikost podílu minerálních látek obsažených ve stromu se liší v závislosti na minerálních látkách obsažených v půdě v okolí stromu, druhu dřeviny, hnojení stanoviště, ročním období, stáří a velikosti dřeviny. (Hofman, 2015)

Tabulka 6: Porovnání obsahů minerálních složek v dřevinách

<b>Menší obsah minerálů</b>	<b>Větší obsah minerálů</b>
Dospělý strom mýtního věku	Mladé stromky z prvních probírek
Strom s malou korunou	Strom s velkou korunou
Měkké dřeviny	Tvrdé dřeviny

Zdroj: Hofman, 2015

Podíl minerálních složek v dřevní štěpce má přímý vliv na množství vyprodukovaného popela. Množství popela záleží na tom, z jakého druhu dřeviny štěpka je, nebo jestli je to směs více druhů dřevin. Dále záleží na intenzitě znečištění dřevní štěpky (výskyt nečistot a asimilačních orgánů).

Nízké zastoupení popelovin ve dřevě výrazně neovlivňuje výhřevnost, na rozdíl od bylinných biopaliv, kde popeloviny výhřevnost ovlivňují. Sice popeloviny neovlivňují výhřevnost, ale i přes své nízké zastoupení ovlivňují technologii spalování štěpky. Proto je zapotřebí přihlídnout k vlastnostem popela, zejména v závislosti na konstrukci kotle, aby nedocházelo k velké produkci emisních plynů a zanášení tahů kotle.

Z důvodu delšího obmýtí, ve srovnání s ostatní biomasou, dochází u stromů k vyššímu hromadění těžkých kovů. Podíl těžkých kovů v dřevině záleží hlavně na lokalitě, kde dendromasa vyrostla. Povolené limity pro další použití však většina těžkých kovů nepřekračuje. Nejčastějším těžkým kovem vyskytujícím se v nadlimitním množství ve dřevě je kadmium (Cd), které je nejvíce obsaženo v kůře stromu. Z tohoto důvodu nadměrné množství kůry ve štěpce může znemožnit další využití popela (například jako hnojiva). (Hofman, 2015)

## **2.6 Elektrické vlastnosti dřeva**

Vliv elektromagnetického pole na dřevo je velmi výrazný. Výsledkem vzájemného působení mezi elektrickým polem a dřevem je vznik elektrického proudu v materiálu. Při působení vnějšího elektrického pole se dřevo v celém rozsahu vlhkosti chová jako dielektrikum – je izolantem v suchém stavu a vlhké dřevo je polovodičem. Kromě relativně malého počtu volných nábojů existují ve dřevě také elektrické náboje, které jsou silně vázány. (Zejda, 2007)

### **2.6.1 Vodivost elektrického proudu**

Jedná se o elektrický odpor dřeva - rezistence. Dřevo patří mezi materiály, které podle obsahu vlhkosti mohou být buď izolanty, nebo i částečně elektricky vodivé. Čím větší je vlhkost materiálu, tím menší je elektrický odpor. Na tomto principu jsou sestrojeny přístroje na měření vlhkosti. (Zejda, 2007)

### **2.6.2 Elektrická pevnost dřeva**

Poměr nejmenšího průrazového efektivního napětí střídavého proudu s průmyslovým kmitočtem k tloušťce dřeva v místě průrazu nebo v jeho těsné blízkosti. Je to schopnost dřeva odporovat probíjení. (Zejda, 2007)

### **2.6.3 Piezoelektrické vlastnosti dřeva**

U některých látek se v důsledku působení vnějších mechanických sil na jejich povrchu objeví elektrické náboje. Největší piezoelektrický efekt je u suchého dřeva, se zvyšováním vlhkosti se snižuje. (Zejda, 2007)

## 2.6.4 Permittivita dřeva

Tento ukazatel je číselně rovný poměru kapacity kondenzátoru s prokladem dřeva ke kapacitě kondenzátoru se vzduchem mezi elektrodami. Ukazuje, jak se mění kapacita kondenzátoru, jestliže vzduch mezi jeho deskami nahradíme vrstvou elektricky nevodivého materiálu. Poměrná permitivita u dřeva je rozdílná, podle směru vláken i podle vlhkosti dřeva. U dřeva je důležitá při jeho zpracování za přímého použití elektrického proudu. (Zejda, 2007)

### Relativní permitivita

Jedním z nejdůležitějších parametrů dielektrika je jeho relativní permitivita (dříve nazývaná dielektrická konstanta). Jedná se o lineární koeficient úměrnosti mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole. Relativní permitivita je makroskopická veličina, která poskytuje určitou kvantitativní informaci o složitých mikroskopických pochodech, odehrávajících se v látce uložené v elektrickém poli. Tyto pochody se nazývají polarizace dielektrika a jsou vyvolány silovým působením elektrického pole na vázané náboje v látce. V běžných materiálech je dielektrická konstanta jediné číslo, v materiálech složitých musíme použít tenzor. (Nelson, 2010)

Tabulka 7: Statická relativní permitivita vybraných materiálů při 20 °C

Látka	Relativní permitivita
Čerstvé dřevo	10 - 30
Křemík	11,7
Vápenec	8
Voda	81,6
Vzduch (suchý)	1,000536

Zdroj: <http://dielektrika.kvalitne.cz/tabulky.html>

## 2.7 Sledované parametry dřevní štěpky

Parametrů charakterizujících dřevní štěpku je celá řada. Sledované parametry se dají rozdělit do dvou kategorií, a to na parametry, které mají vliv na vlastní spalování dřevní štěpky (výhřevnost, vlhkost, prchavá hořlavina, obsah popela a měknutí popelovin) a parametry charakterizující mechanické vlastnosti dřevní štěpky (velikost částic, sypná hmotnost). (Hofman, 2015)



### **2.7.1 Vlhkost**

V porovnání s ostatními palivy je přirozená vlhkost dřeva vysoká a tato vlhkost má i velké rozpětí cca od 20 % u dříví proschlého až do 60 % u čerstvě pokáceného stromu. U kůry čerstvě pokáceného stromu může vlhkost přesahovat i 65 %. Kvůli takto vysoké vlhkosti se při spalování dřeva spotřebovává na jeho vysychání větší podíl energie nežli u jiných paliv. Se zvyšující se vlhkostí se snižuje výhřevnost paliva. Proto je tak důležité dbát na vlhkost dendromasy při jejím spalování. (Hofman, 2015)

Při pokusech bylo zjištěno, že optimální vlhkost štěpek pro spalování je 30 až 35 %. Příliš suché štěpky mají při procesu hoření explozivní charakter a velká část tepelné energie uniká prostřednictvím horkých plynů do atmosféry. Naopak při vysoké vlhkosti je spalování již obtížné a účinnost topeniště klesá. (Chytrý, 2007)

Z hlediska uložení vlhkosti v biomase ji můžeme rozdělit na:

#### **Vodu chemicky vázanou**

Voda chemicky vázaná je součástí chemických sloučenin. Nelze ji z biomasy odstranit sušením, ale pouze spálením, proto je v biomase zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti. Zjišťuje se při chemických analýzách paliva a její celkové množství představuje 1–2 % sušiny. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností nemá žádný význam. (Baláš, 2009)

#### **Vodu vázanou (hygroskopickou)**

Vázaná voda se nachází v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny OH amorfní části celulózy a hemicelulóz. Voda vázaná se v palivu vyskytuje při vlhkostech 0–30 %. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam. (Baláš, 2009)

#### **Vodu volnou (kapilární)**

Voda volná vyplňuje v palivu lumeny buněk a mezibuněčné prostory. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má podstatně menší význam než voda vázaná. (Baláš, 2009)

V dřevařské praxi se vlhkost vyjadřuje dvěma způsoby a to:

- 1) Absolutní vlhkost ( $w_a$ )
- 2) Relativní vlhkost ( $w_r$ ) (Gandelová, 2002)

**Absolutní vlhkost** – obsah vody vztažený ke hmotnosti absolutně suché dendromasy. Tato metoda se používá převážně při fyzikálních a mechanických zkouškách dřeva. V provozní praxi se zpravidla nepoužívá.

Vztah pro výpočet:

$$W_a = \frac{H_1 - H_2}{H_2} * 100 (\%) \quad (1)$$

$H_1$  – Hmotnost vzorku surové dřevní hmoty (Kg)

$H_2$  – Hmotnost vzorku vysušeného dřeva (Kg)

**Relativní vlhkost** – obsah vody vztažený ke hmotnosti (původní, výchozí) dendromasy, tj. včetně vody. Tato metoda se běžně používá v provozní praxi, v obchodním styku a pro výpočty efektivní výhřevnosti dendromasy.

Vztah pro výpočet:

$$W_r = \frac{H_1 - H_2}{H_1} * 100 (\%) \quad (2)$$

$H_1$  – Hmotnost vzorku surové dřevní hmoty (Kg)

$H_2$  – Hmotnost vzorku vysušeného dřeva (Kg)

Tabulka 8: Převod hodnot relativní vlhkosti na absolutní vlhkost

Relativní vlhkost $w_r$	Absolutní vlhkost $w_a$
0	0
10	11
20	25
30	43
40	67
50	100
60	150
70	230
80	400

Zdroj: Hofman, 2015

### 2.7.2 Výhřevnost

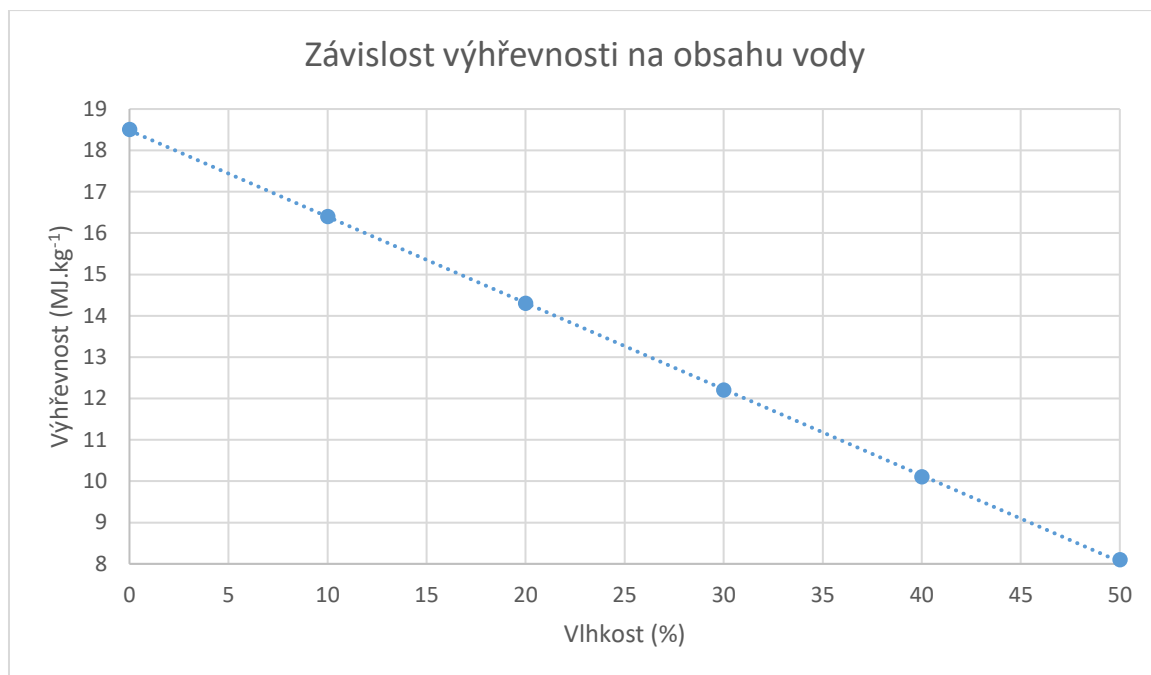
Při oxidačních procesech, které probíhají při hoření paliva, se uvolňuje teplo. U tuhého paliva se teplo vztahuje k jeho hmotnosti a vyjadřuje se jako  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  (při teplotě  $0\text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku  $0,1\text{ MPa}$ ). Teplo uvolněné při hoření se vyjadřuje jako spalné teplo nebo jako výhřevnost paliva. Definicí spalného tepla je množství tepla uvolněného při dokonalém spálení paliva ( $1\text{ kg}$  nebo  $1\text{ m}^3$ ), při ochlazení spalin až na původní teplotu paliva ( $0\text{ }^\circ\text{C}$ ). Přičemž je všechna pára obsažená ve spalinách úplně zkondenzovaná (odevzdala všechno své teplo).

Výhřevnost paliva je definována jako množství tepla uvolněného z paliva, přičemž vlhkost paliva zůstane ve spalinách spolu s tepelnou energií, použitou na přeměnu vody ve vodní páru. Hodnota výhřevnosti paliva je tedy nižší o energii potřebnou k ohřevu vody. (Hofman, 2015)

Efektivita výhřevnosti dřeva závisí především na okamžité vlhkosti, dřevině a poměru celulózy a ligninu. Lignin má výhřevnost  $25,5\text{ GJ/t}$  a celulóza má výhřevnost  $18,8\text{ GJ/t}$ . (Chytrý, 2007) V dřevu můžeme najít i další složky, které mohou zvyšovat výhřevnost dřeva. Příkladem běžně se vyskytující složky je pryskyřice. Roční období má též vliv na výhřevnost dřeva.

V průběhu roku dosahuje výhřevnost nejvyšších hodnot v druhé polovině léta, v červenci a v srpnu. Výhřevnost se mění i v závislosti na vývoji počasí mezi jednotlivými roky. Tyto rozdíly však nejsou zásadní. V běžném prostředí je suchá dendromasa nedosažitelný imaginární stav. (Hofman, 2015)

Obrázek 3: Závislost výhřevnosti na obsahu vody (upraveno)



Zdroj: Hofman, 2015

Tabulka 9: Výhřevnost štěpky v závislosti na relativní vlhkosti

Charakter štěpky	Relativní vlhkost v %	Výhřevnost GJ/t
Čerstvá	60	9,2
Zavadlá	40	10,1
Polosuchá	30	12,2
Suchá	20	14,3

Zdroj: Chytrý, 2007

### 2.7.3 Sypná hmotnost

Sypná hmotnost udává poměr mezi hmotnostmi a objemem dřevní štěpky ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Sypná hmotnost je závislá na druhu dřeviny, vlhkosti dřeviny, původu dřeviny, hustotě, velikosti a podílu frakcí. Sypná hmotnost ovlivňuje konstrukci dávkovacích a dopravních zařízení a též i skladovací a přepravní objem dřevní štěpky. (Pastorek, 2004)

Tabulka 10: Sypná hmotnost štěpky z běžných druhů dřeva

Druh dřeva	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Druh dřeva	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Druh dřeva	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Akát	240/360	Jasan	268/402	Modřín	220/330
Borovice	204/306	Javor	240/360	Olše	196/294
Bříza	256/384	Jedle	164/246	Osika	180/270
Buk	272/408	Jilm	256/384	Smrk	172/258
Dub	272/408	Lípa	208/312	Topol	164/246
Habr	300/450	Líska	224/336	Vrba	208/312

Zdroj: Hofman, 2015

1. číslo – sušina 2. číslo – 50% vlhkost

### 2.7.4 Velikost štěpek

V závislosti na velikosti frakce mohou vznikat problémy zejména s dopravou, vznikem prachových částic, snížení prostoru vzduchu při sušení, omezení zásobování palivem a omezení optimální distribuce částic v hořáku. (Hofman, 2015)

Tabulka 11: Rozměry dle CEN/TS 15149-2

Třída	Hlavní frakce alespoň 75% w-%, mm <sup>A</sup>	Jemná frakce, w-%	Hrubá frakce, w-%
P16A <sup>C</sup>	3,15 < P < 16 mm	< 12 %	< 3% >16 mm a vše < 31,5 mm <sup>C</sup>
P16B <sup>C</sup>	3,15 < P < 16 mm	< 12 %	< 3% >45 mm a vše < 120mm <sup>C</sup>
P45A <sup>C</sup>	8 < P < 45 mm	< 8 % <sup>B</sup>	< 6% > 63 mm, a max. 3,5 % > 100 mm, vše < 120 mm,
P45B <sup>C</sup>	8 < P < 45 mm	< 8 % <sup>B</sup>	< 6% > 63 mm, a max. 3,5 % > 100 mm, vše < 350 mm
P63 <sup>C</sup>	8 < P < 63 mm	< 6 % <sup>B</sup>	< 6% > 100 mm a vše < 350 mm
P100 <sup>C</sup>	16 < P < 100 mm	< 4 % <sup>B</sup>	< 6% > 200 mm a vše < 350 mm

Zdroj: Hofman, 2015

<sup>A</sup> Číselné hodnoty (P-třída) rozměrů odkazují na velikosti částic procházejících sítím s kulatým otvorem o velikosti podle norem EN 15149-1

<sup>B</sup> Hlavní frakce pro P45B je 3,15 < P < 45 mm, P63 (3,15 < P < 63 mm), P100 (3,15 < P < 45 mm), a výše jemné frakce může být maximálně 25% podílu frakce (w-%), pokud je surovina klest, který obsahuje tenké části jako větvičky, jehličí nebo listí.

<sup>C</sup> Plocha příčného řezu pro nadměrné částice musí být pro P16 až P100 < 18 cm<sup>2</sup>.

### 2.7.5 Teplota tání popelovin a spékání popele

Pokud je teplota tání popele nižší než teplota plamene při hoření, dochází k jeho tavení. Pokud se popel roztaví a nalepí na rošt, může způsobovat problémy s chodem topeniště. Tyto potíže s nízkou teplotou tání popele mají hlavně biopaliva bylinného původu (sláma 800 – 900 °C). Dřevo má zpravidla teplotu tání popele dostatečně vysokou (1 100 – 1 200 °C), ale i přesto se popel při spalování může tavit. Křemík (Si) a draslík (K) snižují teplotu tání popele. Tyto dva prvky se mohou dostat do dendromasy v průběhu těžby a při soustředování dřeva spolu se zeminou.

Kombinací paliv obsahujících nízkotající popel a vysokotající popel můžeme zabránit zalepování roštu. To bude mít za následek, že nízkotající popel se po roztavení přilepí a obalí okolo vysokotajícího popela a nebude zalepovat rošt. (Hofman, 2015)

## 3 Metody pro měření parametrů dřevní hmoty

### 3.1 Metody zjišťování vlhkosti dřeva

Tabulka 12: Přehled možných metod měření vlhkosti biomasy

Metoda	Možnost měření on-line	Aplikace metody na množství (M) nebo tok materiálu (T)	Velikost chyby
Gravimetrická metoda	N		2,5 %
Vodivostní (odporové) metody	N		do 10 %
Dvojúrovňové rentgenové záření	A	M (cca 2 kg)	2 %
Nepřímé měření vlhkosti (Určování účinnosti)	A	M	1 – 2 %
Snímání elektromagnetickými vlnami (RF)	A	M,T	0,1 – 6 %
Infračervení spektroskopie (NIR)	A	T	0,3 – 7 %
Mikrovlnná metoda	A	T	2 %
Nukleární magnetická rezonance (NMR)	A	V současnosti M, ale zlepšení na T pro dřevní štěpku	0,3 %

Zdroj: Baláš, 2009

#### 3.1.1 Přímé metody

Princip přímých metod spočívá v přímém zjištění reálného množství vody ve dřevě za pomoci vážení. Mezi nejpoužívanější přímé metody patří gravimetrická metoda (v praxi nazývaná váhovou metodou) a destilační metoda.

Díky těmto metodám je možné stanovit u většiny dřevních produktů vlhkost, a to prakticky v rozmezí od 0 % vlhkosti až po maximální nasycení. Díky jejich přesnosti je měření pomocí těchto metod dostačující jak pro praktické účely, tak i pro účely výzkumné. Největší nevýhodou těchto metod je časová náročnost, a proto se nehodí k častému měření vlhkosti. (Hofman, 2015)

## Gravimetrická metoda

Tato metoda je založena na principu stanovení hmotnosti vlhkého a vysušeného dřeva vážením. Vzorek, u kterého chceme zjistit vlhkost, se nejdříve zváží a poté se nechá v sušící peci vysušit při teplotě 100 – 105 °C. Po vysušení se vzorek znovu zváží a absolutní, či relativní vlhkost vzorku se zjistí pomocí vzorců (1) a (2).

(Baláš, 2009)

Další možností, jak vysušit vzorek, je ponechat ho v prostředí s nulovou vlhkostí. Prostředí s nulovou vlhkostí můžeme vytvořit například s pomocí silikagelu, chloridu

vápenatého nebo kyseliny sírové. Tlak vodních par ve dřevě je vyšší než tlak okolního prostředí, a proto mohou molekuly vodní páry unikat ze dřeva do okolního prostředí až do úplného vysušení. Tento proces je ale mnohem náročnější a zabere i více času. (Hofman, 2015)

Obrázek 4: Halogenová sušící váha

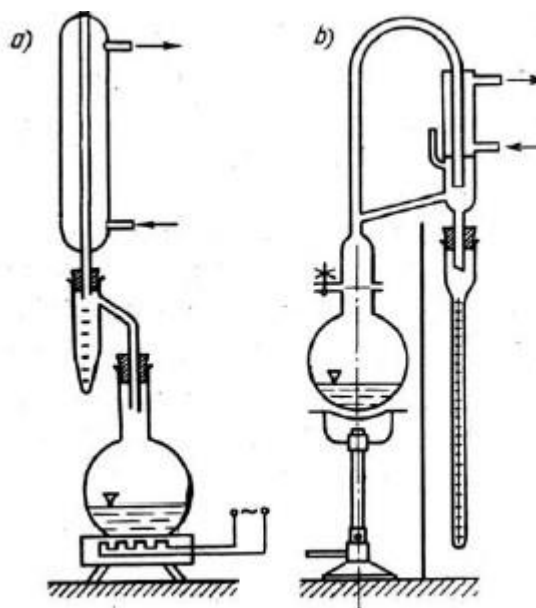


Zdroj: Baláš, 2009

## Destilační metoda

Podstatou této metody je určit hmotnost vody na základě jejího objemového množství obsaženém ve vzorku. Tato metoda má využití zejména v případech, kdy je použití metody vážení obtížné (například když je dřevo impregnované olejovými barvami). (Baláš, 2009)

Obrázek 5: Zkušební aparatura ke stanovení vlhkosti destilační metodou



Zdroj: Baláš, 2009



Postup měření:

1. Zvážíme vzorek dřevěné štěpky.
2. Vzorek uložíme do baňky s kapalinou o jiné hustotě než voda (xylen, benzen).
3. Ohřejeme baňku ve vodní lázni.
4. Páry vody a použité kapaliny zkondenzují ve chladiči a stečou do kalibrované předlohy v dolní části.
5. Objemové množství vody obsažené ve štěpce se přepočte na hmotnostní podíl a dosadí do vzorce vlhkosti.

### 3.1.2 Nepřímé metody

Nepřímé metody určování vlhkosti dřevní štěpky se zjišťují na základě známých zákonitostí zjištěných teoreticky nebo empiricky mezi vlhkostí dřevní štěpky a jinou veličinou, přičemž není potřebné stanovit hmotnost dřevní štěpky nebo vody v ní obsažené. (Baláš, 2009)

#### Odporová metoda

Odporová metoda využívá k zjištění vlhkosti měřících přístrojů s integrovanou hrotovou sondou založenou na změně vodivosti (odporu) dřeva v závislosti na jeho vlhkosti. Změřená velikost odporu je přímo, za pomoci charakteristik, přepočítána na relativní vlhkost materiálu. Při měření vlhkosti dřeva je důležitá teplotní kompenzace měření. Nejčastěji se používají k měření vlhkoměry s ocelovými hřeby, které se zarážejí do měřeného materiálu. Přesnost tohoto měření se pohybuje v rozmezí  $\pm 0,2$  až  $\pm 0,5$  %. Nevýhodou metody je, že se jedná o bodové měření, takže u větších celků je nutné měření opakovat. Měření se dá použít jen u kusového dřeva, u nehomogenní biomasy ji nelze použít. (Baláš, 2009)

Obrázek 6: Ruční dotykový měřič



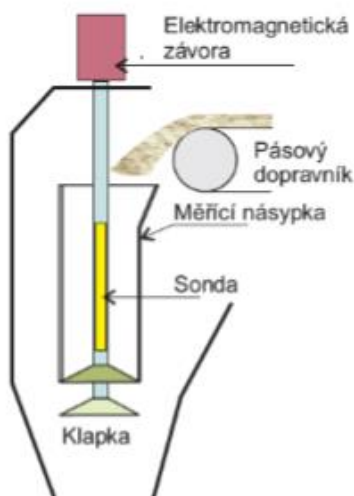
Zdroj: Baláš, 2009

## Neutronové měření

Metoda neutronového měření je založena na pružném rozptylu rychlých neutronů na jádrech vodíku. Vodík ze všech prvků nejúčinněji rozptyluje a zpomaluje neutrony. Metoda se měří pomocí bezdotykových přístrojů. Tyto přístroje měří intenzitu neutronového záření po absorpci dřevem. Odezva toku neutronů je určena celkovým objemem vlhkosti. Měřič se vždycky minimálně skládá ze zdroje rychlých neutronů a detektoru pomalých neutronů. Používají se dva typy uspořádání. Lze použít buď uspořádání odrazové, kde se měří vzrůst toku zpomalených neutronů v důsledku jejich rozptylu v okolním materiálu obsahujícím jádra vodíku, nebo uspořádání prozařovací, kde se měří zeslabení toku neutronů ze zdroje vlivem jejich rozptylu na jádrech vodíku. Tato metoda je vhodná pro určení vlhkosti sypkých materiálů (zemina, obilí, uhlí atd.). Výhodou této metody je, že je proměřován relativně velký objem materiálu (až 0,1 m<sup>3</sup>). (Baláš, 2009)

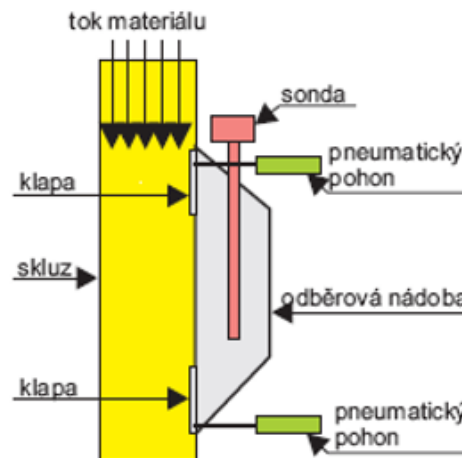
Většina systémů se skládá z vyhodnocovací jednotky, vysokonapěťového zdroje, bloku zesilovače a detekční jednotky. Umístění detekční jednotky může být přímo v dopravním zařízení měřeného materiálu, nebo do předem zhotovené měřicí nádoby. Před uvedením do provozu je nutná kalibrace zařízení. Pokud je potřeba stanovovat hmotnostní vlhkost, používají se kombinované neutronové + gama sondy obsahující neutronový zdroj i zdroj gama-záření (např. <sup>137</sup>Cs) a detektor neutronů i detektor gama (bývá často sloučeno do jedné kompaktní sondy). Odezvou na záření gama lze stanovit podíl vlhkosti materiálu, z neutronové odezvy jeho vlhkosti. (Baláš, 2009)

Obrázek 8: Nádoba v přesypu



Zdroj: Baláš, 2009

Obrázek 7: Nádoba ve skluzu



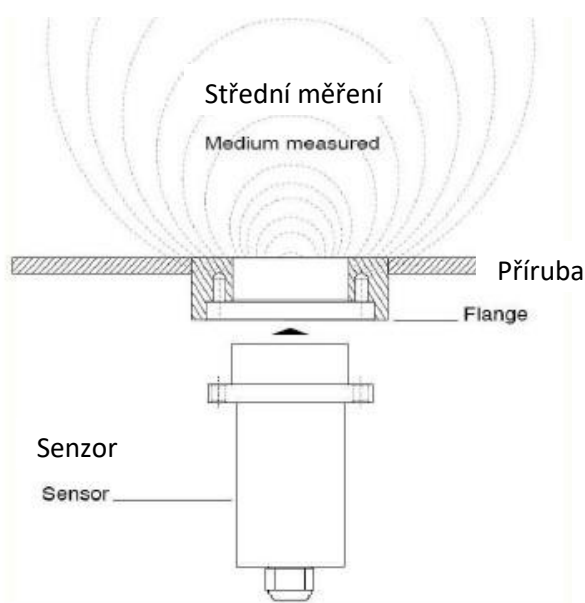
Zdroj: Baláš, 2009

## Mikrovlnná metoda

Metoda měření mikrovlnnými vlnami je vhodná pro kontinuální měření. Princip metody je založen na dipólovém chování molekul vody. Voda přítomná v produktu se dostává do interakce s harmonickým elektromagnetickým rezonančním polem, které vychází z generátoru mikrovlnných vln. Detektorem se zjišťují změny vzniklé v elektromagnetickém poli a následně se vyhodnocují v mikroprocesoru (CPU), a poté jsou uloženy a zobrazeny na displeji. Při průchodu porézní látkou dochází ke změně elektromagnetického mikrovlnného záření (EMVZ). EMVZ je ve větší míře pohlcováno volnou vlhkostí obsaženou v produktu a v menší míře pevnou fází dané látky. (Nelson, 2010)

Energie absorbovaná látkou je použita k překonání třecích sil, které brání molekulám přítomným v látce v pohybu. K pohybu jsou molekuly nuceny působením EMVZ. Čím více se mohou molekuly v poli EMVZ natáčet či deformovat a čím více je prostředí hustější, tím je útlum větší. Molekulární řetězce v krystalové mřížce porézní látky se nemohou takřka vůbec pohybovat, a proto EMVZ nepohlcují. Molekuly vody v kapalně fázi a molekuly vodní páry se mohou natáčet v poli EMVZ velice snadno, z tohoto důvodu voda pohlcuje mikrovlny intenzivně. (Baláš, 2009) (Nyström, 2004) (Hansson, 2005)

Obrázek 9: Umístění mikrovlnného snímače



Zdroj: Baláš, 2009

## Kvantitativní analýza pomocí NIR spektrometrie

Tato analýza je nedestruktivní a rychlá metoda chemické analýzy. Spočívá v takových interakcích elektromagnetického záření, které jsou spojeny s výměnou energie mezi hmotou a zářením, přičemž energie z NIR záření může změnit pouze rotační nebo vibrační stav molekuly. Princip metody tedy spočívá v měření odraženého (popř. prošlého) elektromagnetického záření vzorkem. (Baláš, 2009) (Nyström, 2004)

Při ozáření materiálu infračerveným zářením je část světla pohlcena a část odražena. Spektrum záření závisí na hustotě, vlhkosti materiálu a chemickém složení. Dvouatomové vazby C-H, O-H, N-H a S-H jsou pohlcovány absorberými. Změna stavů rotačně-vibračních vazeb je příčinou absorpce světla. Koncentrace řady komplexních látek v analyzovaném materiálu je přímo úměrná počtu těchto vazeb. Tyto závislosti se dají analyticky využít. Informace o chemickém složení vzorku můžeme vyhodnotit z energie odraženého světla. Před provedením měření metody je zapotřebí provést analytickou kalibraci, kterou se rozumí závislost optických dat na obsahu stanovované složky. Jde o řadu numerických konstant pro jednotlivé vlnové délky pro každou kombinaci analyzovaného produktu a parametru. Mikroprocesor z kalibračních konstant a naměřených hodnot energie vyčíslí výsledky analýzy. (Baláš, 2009) (Nyström, 2004)

Výhodou analýzy je rychlost a přesnost měření. Metoda je však finančně velice náročná vzhledem na použitou technologii.

Obrázek 10: NIR Analyzer

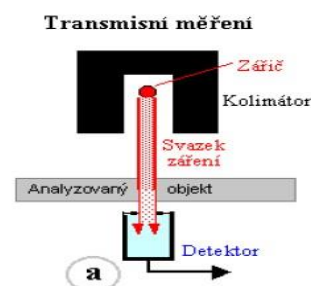


Zdroj:  
<http://unityscientific.com/products/near-infrared-spectroscopy/>

### Dvouúrovňové rentgenové zařízení

Metoda dvouúrovňového rentgenového zařízení využívá rentgenové záření absorbované materiálem v závislosti na celkové hodnotě radiačního paprsku. Na jedné straně je emitör (zářič) vysílající rentgenové záření ve dvou vlnových frekvencích (19,9 PHz a 40 PHz). Naproti emitöru je umístěný detektor, který zachycuje zeslabený signál z původních dvou frekvencí, kterým se podařilo projít skrz materiál. Lehčí prvky, jako jsou uhlík (C) a kyslík (O), ovlivňují fotoelektrickou absorpci paprsku. Díky tomu je možní rozlišit volný vodík a vazby vodíku (Vodu a uhlovodíky). (Baláš, 2009) (Nyström, 2004)

Obrázek 11: Schéma měřiče vlhkosti využívající rentgenové zařízení

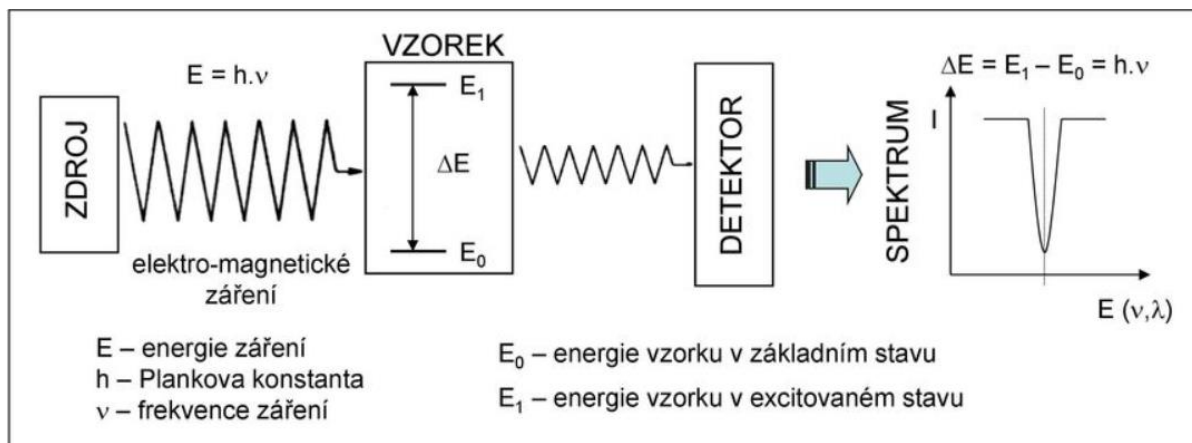


Zdroj: Baláš, 2009

Obsah vlhkosti je měřitelný v rozmezí 10 - 75,3 % obsahu. Jde o relativní metodu, proto potřebuje kalibraci.

## Nukleární magnetická rezonance (NMR)

Obrázek 12: NMR - princip



Zdroj: [http://docplayer.cz/docs-images/40/14885291/images/page\\_2.jpg](http://docplayer.cz/docs-images/40/14885291/images/page_2.jpg)

Vodík má tu vlastnost, že se chová jako malý magnet, z tohoto důvodu se vždy v magnetickém poli seřadí do určitých úhlů. Na přesun vodíku, z jednoho uspořádání do druhého, musí být vynaloženo určité množství energie, které závisí na síle magnetického pole. Pohyb může být zaznamenán pomocí NMR spektroskopie. Přístroje pro on-line měření bývají s permanentním magnetem a mezerou pro průchod vzorku. Dále jsou vybaveny cívkami na změnu magnetického pole, cívkami pro detekci a generování ztrát energie a teploměrem. Použitá energie je elektromagnetická radiace v RF – oblasti. (Baláš, 2009) (Nyström, 2004)

Pro dosažení správných výsledků měření musí být udržena konstantní hustota vzorku a nesmí být přítomny žádné magnetické materiály v okolí. Jde o nepřímou metodu, takže je potřebná kalibrace přístroje.

### Snímání elektromagnetickými vlnami

Bio paliva patří mezi polární dielektrika. U těchto dielektrik při působení pole na kladné a záporné konce dipólů vznikají točivé momenty a dipóly se otáčejí o určitý úhel, jehož velikost závisí na velikosti  $E$  (elektrického pole). Pokud se velikost pole změní z nuly na nenulovou ustálenou velikost, proběhne polarizace za určitou dobu (velmi rozdílnou u různých látek) a soustava přejde do polarizovaného uspořádání. Vzniklá orientace dipólů vytvoří na povrchu dielektrika polarizační náboj, který je třeba kompenzovat dalším nábojem ze zdroje. (Nyström, 2004)

Ztráty vzniklé přeměnou energie na teplo, které vzniká třením při pohybu nabytých částic a současné ztráty vzniklé kapilární vodou ve vzorku, oslabují vysílaný signál. Systém pro měření podílu vlhkosti ve vzorku pomocí rádiové frekvence by se měl skládat z počítače, síťového analyzátoru a vzorku umístěného mezi dvěma plochami. Tyto plochy slouží jako antény pro vysílání a příjem signálu. Síťový analyzátor vysílá skrze tyto antény elektromagnetickou radiaci v rozsahu oblasti pro rádiové frekvence. Tato metoda je podobná mikrovlnné metodě. Ve vzorku se vytváří elektrické pole a v anténách se zachytává vysílaný a odražený signál. Fázový posun a útlum jsou vypočítávány jak z reálné, tak i z imaginární části signálu. Stejně jako u NIR metody, hustota, hmotnost a teplota ovlivňují spektrum a multivariační analýza je jedním ze způsobů provedení kalibrace. Multivariační kalibrace je statistická metoda, při níž jsou různé parametry, které ovlivňují měření strukturálně, přeneseny do různých měřicích komponentů a počítače. Dalším způsobem, jak předpovědět vlhkost vzorku, je vypočítat relativní permitivitu. Vzorec pro výpočet je  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  kde  $\epsilon'$  je relativní permitivita a  $\epsilon''$  je faktor dielektrických ztrát. Také je možné udělat měření v časové doméně. (Nyström, 2004)

Obrázek 13: Síťový analyzátor



Zdroj:  
<http://expresshire.net/product/electrical-monitoring/power-quality-meters/fluke-435>

### 3.2 Metody zjišťování výhřevnosti dřeva

Výhřevnost dřeva nejvíce ovlivňuje obsah vody ve dřevě, proto se výhřevnost dřeva určuje na základě jeho vlhkosti a výhřevnosti sušiny. (Pastorek, 2004)

Aktuální výhřevnost paliva je vyjádřena vztahem:

$$H_u = \frac{H_{uWf}(100-w)-(r*w)}{100} \quad (MJ.kg^{-1}) \quad (4)$$

$H_u$  – aktuální výhřevnost paliva ( $MJ.kg^{-1}$ )

$H_{uWf}$  – výhřevnost sušiny ( $MJ.kg^{-1}$ )

W – obsah vody v palivu (%)

r – teplo potřebné na odpaření 1 kg vody (2,44 MJ)

## Kalorimetrie

Je to metoda pro stanovení výhřevnosti sušiny. Výhřevnost sušiny se zjišťuje pomocí isoperibolické metody (tj. při konstantní hodnotě výměny tepla s okolím), která se provádí v kalorimetrické nádobě pomocí kalorimetru.

Výhřevnost sušiny se provede pomocí následujícího vzorce:

$$H_{uWf} = H_u * \frac{100}{100-w} (Mj. kg^{-1}) \quad (5)$$

$H_{uWf}$  – výhřevnost sušiny ( $Mj. kg^{-1}$ )

$H_u$  – aktuální výhřevnost paliva ( $Mj. kg^{-1}$ )

W – obsah vody v palivu (%)

Výhřevnost sušiny objektivně stanovuje disponibilní množství energie, které je získáno spálením paliva. Největší nevýhodou této metody je potřeba speciálního vybavení. Toto vybavení je finančně nákladné a většinou se nachází jenom v analytických laboratořích. Pokud známe výhřevnost sušiny, můžeme snadno vypočítat aktuální výhřevnost paliva pomocí vzorce (4). Pokud neznáme výhřevnost sušiny daného paliva, použijeme tabulkový průměr pro dané palivo. (Hofman, 2015)

### **3.3 Stanovení množství těkavých látek**

Pro dřevo je specifické vysoký podíl těkavých látek uvolňovaných pyrolýzou (75 až 85 %) nehořících na roštu, ale v prostoru mezi roštem a komínem. To výrazně ovlivňuje konstrukci topenišť pro dřevo tak, aby jejich účinnost byla dostačující a nedocházelo k produkci nežádoucích emisí, které může zapříčinit nedokonalé spalování. (Pastorek, 2004)

Stanovit množství těkavých látek je celkem náročné a vyžaduje vysoce specializované vybavení a zároveň rozdíly v obsahu těkavých látek v palivu ze dřeva nejsou tolik významné.

### **3.4 Zjišťování velikosti a podílu frakcí**

Velikost a podíl zastoupených frakcí je jedním ze základních parametrů, které se u dřevní štěpky posuzují. Požadavky spalovacího zařízení na velikost frakce se liší v závislosti na typu konstrukce.

Nevhodná velikost a podíl frakce může způsobovat:

- Poškození a ucpávání zařízení k dopravě paliva (např. u šnekových dopravníků)
- Omezení využití transportu štěpky proudem vzduchu
- U velkých částí je snížena účinnost pedsoušení paliva
- Změny v podílu frakcí mohou způsobit nevyrovnanost v přísunu paliva
- Nerovnoměrnost pokrytí roštu ohniště palivem
- Velký podíl jemné frakce způsobuje prašnost při manipulaci s palivem
- Větší frakce nemusí stihnout dostatečně prohořet

Tvar a velikost dřevní štěpky je zejména ovlivněna použitou technologií štěpkování a druhem dřeviny. Ke stanovení podílu velikostí jednotlivých frakcí slouží dva typy třídících zařízení, a to s horizontálně umístěnými sítý nebo rotační třídící zařízení. (Hofman, 2015)

Princip třídění frakcí je jednoduchý. Umístěná síta mají určitý průměr ok a dřevní hmota menší, než je průměr oka propadne dnem síta, zatím co větší částice zůstanou na sítech. Tímto způsobem se zjistí velikost částic, nikoliv jejich délka.

### **3.5 Zjišťování obsahu kůry ve štěpce**

Obsah kůry je zejména sledován v papírenském průmyslu při přejímce štěpky, protože s kůrou má dřevní hmota pozmeněné chemické složení a tato změna by ovlivňovala výrobu a vlastnosti papíru. Tento parametr bývá posuzován i u energetické štěpky, protože podíl kůry významně ovlivňuje množství produkovaného popele.



### **Stanovení obsahu kůry**

Pro stanovení obsahu kůry ve štěpce se odebere vzorek o objemu cca 0,5 – 1 l nevytříděných štěpků a zváží se. Poté se ze vzorku ručně odstraní všechny částice kůry a pomocí nože se odstraní kůra, která se nachází na štěpkách. Oddělená kůra se poté zváží. (Hofman, 2015)

Obsah kůry ze vzorku je zjištěn dle vzorce:

$$K = \frac{m \cdot 100}{M} \quad (6)$$

K – váhové procento obsahu kůry v dodávce (%)

M – váha nevytříděného vzorku (kg)

m – Váha separované kůry (kg)

## **4 Cíl práce**

Hlavním cílem této diplomové práce je na nově vyvinutých přístrojích naměřit elektrické vlastnosti různých typů dřevní štěpky, vyhodnotit funkci přístroje a porovnat naměřené dielektrické vlastnosti. Dalším cílem pak je ekonomické porovnání dřevní štěpky s fosilními palivy.

## 5 Konstrukce měřicí aparatury a metodika měření

### 5.1 Metodika měření

Testy se prováděly na dřevní štěpce, která se v prvním kroku separovala na jednotlivé frakce za pomoci síťového prosévače a následně zvažila a namočila do destilované vody a zůstala namočená po dobu 12 hodin. Po namočení se vzorky nechaly odkapat, aby se zbavilo přebytečné vody a znovu se vzorky zvažily. Po zvažení proběhla samotná měření. Na aparatuře se zjistila kapacita a elektrický ztrátový faktor v elektromagnetickém poli, a to pro různé hodnoty frekvence. Poté se vzorky sušily v peci a měření se opakovala. Celkový počet měření byl uskutečněn pro 3 stupně vlhkosti, které následně byly vypočítány gravimetrickou metodou z hmotností vzorků při vážení (viz. 3.1.1 přímé metody měření). Výsledky se zavedly do grafů závislosti elektrických vlastností štěpky. Měření probíhalo při stejné teplotě vzorků.

### 5.2 Měřicí aparatura

#### 5.2.1 Digitální teploměr Greisinger GTH 175/Pt

Je to praktický a přesný teploměr německé výroby s ponorným snímačem z nerezové oceli o průměru 3 mm, silikonovým kabelem a plastovou rukojetí. Silikonový kabel odolá teplotě až  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a plastová rukojeť je odolná proti teplotě do  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Snímač je kalibrován v rozsahu  $0$  až  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a je doporučený jako referenční přístroj pro kalibraci měřicích systémů. V návodu se uvádí, že tento teploměr je schopný měřit teplotu v rozmezí od  $-199,9^{\circ}\text{C}$  do  $+199,9^{\circ}\text{C}$  a odchylka v naměřené teplotě je  $0,1\%$ .

Obrázek 14: Greisinger GTH 175/Pt



Zdroj: Autor

### 5.2.2 Laboratorní síťový prosévač Haver EML DP

Je to prosévací stroj německé výroby, který může prosévat jak suchý, tak i mokrý materiál. Skládá se ze samostatného stroje, jehož spodní část je od horní části oddělena pružinami, které minimalizují přenos vibrací na spodní část. Do horní části se ukládají nádoby se síťovým dnem, kde dole je nádoba s nejmenším průměrem síta a nahoře s největším průměrem. Materiál je tříděn na jednotlivé frakce díky vibracím, které stroj vytváří a menší částice postupují nádobami směrem dolů, dokud jim to velikost ok na sítu dovolí. Na stroji se dají nastavit 3 veličiny. První veličinou je čas v minutách, po který bude stroj pracovat. Druhou je interval v sekundách.

Obrázek 15: Haver EML digital plus



Zdroj: Autor

Pokud je interval nastaven na hodnotu 0 tak jsou vibrace kontinuální až do uplynutí nastaveného času. Pokud má interval nějakou hodnotu (například 10) tak bude stroj pracovat přerušovaně a interval je nastavená hodnota (při intervalu 10 se bude každých 10 sekund zastavovat). Poslední hodnotou je amplituda. Tato hodnota nastavuje intenzitu vibrací od 0,1 do 3.

### 5.2.3 Váha Ohaus CD - 11

Obrázek 16: Ohaus CD - 11

Tato váha americké korporace Ohaus pracuje se šesti alkalickými "C" bateriemi a může být externě napájena dodávaným síťovým adaptérem. Šestimístný LCD displej má výšku 2,5 cm, což umožňuje snadnou viditelnost i na větší vzdálenost od váhy. Čtyři spínače namontované na čelním panelu umožňují jednoduché nastavení. Váha je vybavena pamětí pro uchování nastavení. Ve váze je také zabudováno rozhraní RS232. Přesnost váhy je na 10 g.

V oblasti telekomunikací je RS-232 standardem pro sériový přenos dat. Definuje signály propojující zařízení DTE (datové koncové zařízení), jako je počítačový terminál, a DCE (zařízení pro ukončení datového obvodu nebo zařízení pro datovou komunikaci), jako je modem. Standard RS-232 je běžně používán v počítačových sériových portech.



Zdroj: Autor

#### 5.2.4 Aparatura pro měření elektrických vlastností

Tato aparatura byla vyrobena v univerzitních dílnách na ČZU a slouží k měření elektrických vlastností měřených vzorků. Aparatura se skládá ze dvou kovových desek umístěných naproti sobě, které slouží jako antény pro vysílání elektromagnetických signálů a tyto signály dále zpracuje LCR metr a zobrazí požadované veličiny (Pro tuto práci se měří C a D). Na jedné kovové desce je přivařen šroub sloužící jako vstup pro vysoké napětí a druhá kovová deska se skládá ze dvou částí.

Obrázek 17: Aparatura pro měření elektrických vlastností



Zdroj: Autor

Vnitřní část je kovová čtvercová deska o straně  $a = 150$  mm umístěná uprostřed s přivařeným šroubem, ke kterému se připojuje výstup a vnější kovové desky, ke které se přes šroub připojuje uzemnění. Aparatura má tvar kvádru a jeho 5 stěn je vyrobeno z plastů dohromady spojených plastovými šrouby. Horní strana aparatury je nekryta. Rozměry nádoby jsou  $290 \times 280 \times 140$  mm a objem nádoby je  $6\,500\,000$  mm<sup>3</sup>.

#### 5.2.5 GW Instek LCR-8110G

LCR metry jsou typ elektronického zkušebního zařízení používaného k měření indukčnosti (L), kapacity (C) a odporu (R) elektronické součásti. V jednodušších verzích tohoto přístroje byla impedance měřena interně a převedena na displej na odpovídající kapacitní nebo indukční hodnotu. Měření by mělo být přiměřeně přesné, pokud zkoušené kondenzátorové nebo indukční zařízení nemá významnou odporovou složku impedance. Pokročilejší konstrukce měří skutečnou indukčnost nebo kapacitu, jakož i ekvivalentní odpor kondenzátorů a Q faktor indukčních prvků.

Měřicí přístroj LCR-8110G od Thaiwanské firmy GW Instek poskytuje přesnost a všestrannost pro širokou škálu měření součástek, a to včetně měření stejnosměrného odporu a monitorování napětí nebo proudu. Tento přístroj se převážně používá ke kontinuální kontrole ve výrobě, ale díky přesnosti se hodí i na laboratorní měření. Tento LCR přístroj má i funkci Multi-Step, která umožňuje přizpůsobené měření pomocí testů

Obrázek 18: GW Instek LCR-8110G



Zdroj: Autor

Pass / Fail dle požadavků uživatele. Parametry a omezení jsou definovány samostatně pro každý krok programu. Rozhraní GPIB a RS-232C jsou instalovány jako standardní funkce pro ovládání přístroje a pro čtení výsledků měření. Volitelný režim grafu může zobrazovat charakteristiky komponent v grafech v širokém frekvenčním rozsahu nebo v různých napětích. Rozpětí možného měření frekvence je od 20 Hz do 10 MHz s přesností +/- 0,005 %.

### 5.2.6 Sušící pec Memmert typ UFB500

U této pece, německé výroby z nerezové oceli, se dá nastavovat teplota po 0,5 °C a díky této přesnosti je vhodná k použití na vědecké účely a provádění testů, při kterých se musí vzorky sušit. Pec je vybavena všemi potřebnými senzory, včetně ochrany při selhání této senzorů. Teplota sušení může být nastavena v rozmezí od 30 °C do 220 °C a časovač se dá nastavit od 1 min. do 99h a 59minut. Po zahřátí sušeného materiálu je přebytečná vlhkost odváděná proudem vzduchu, který vytváří jeden ventilátor umístěný v zadní části pece.

Obrázek 19: Memmert typ UFB500



Zdroj: Autor

### 5.3 Metodika ekonomického zhodnocení

Nejdříve je dřevní štěpka porovnávána s ostatními palivy pomocí metody pořadí (tabulka 1). Touto subjektivní metodou se zjistí, jestli je její využití jako paliva výhodné, nebo nikoliv. Dále se porovnávaly náklady na výhřevnost spojené s koupí dřevní štěpky a fosilních paliv (černé a hnědé uhlí). Výpočty probíhaly tak, že se nejdříve zjistila cena u každého paliva pro 1 kilogram z průměru cen od pěti různých prodejců a následně se vypočítaly náklady vztažené na 1 MJ výhřevnosti.

Celkové porovnání nákladů vzniklých při topení fosilními palivy a dřevní štěpkou je uvedeno pomocí příkladu, ve kterém jsou vypočteny investiční a variabilní náklady spojené s vytápěním vybraného domu po dobu provozu 10 let.

## 6 Postup laboratorního měření

Při laboratorní měření byla pro vzorky použita štěpka určená pro uzení potravin vyrobená z buku bez kůry. Štěpka byla rozdělena pomocí sít (kap. 5.2.2) na tři frakce a to na frakci  $> 5$  mm, 3,15 – 5 mm a frakci  $< 3,15$  mm. Po roztřídění se štěpka namočila do destilované vody po dobu 12 hodin. Po uplynutí dané doby se nechaly vzorky odkapat po dobu jedné hodiny a poté proběhlo vážení štěpky a měření jejich elektrických vlastností, přesněji kapacity (C) a elektrického ztrátového faktoru (D). Měření proběhlo při frekvencích 100 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 5 MHz a 10 MHz. Toto měření se pro každou frakci provedlo třikrát a před každým měření se štěpka znovu promíchala, aby nedošlo k tomu, že voda steče do spodní části aparatury. Při měření se měřila jak teplota vzduchu, tak i teplota měřené štěpky. Po dokončení měření se štěpka dala sušit do pece (pec Memmert UFB500) při 105°C po dobu 20 minut. Po vysušení se vzorky hermeticky uzavřely v igelitových sáčcích a nechaly vychladnout na požadovanou teplotu měření. Měření se opakovalo se stejným postupem (postup po odkapání štěpky) ještě dvakrát, takže celkově je dvanáct měření pro čtyři různé vlhkosti u každé frakce. Jediný rozdíl v postupu měření bylo, že se po druhé v peci vzorky sušily 25 minut a po třetí 12 hodin, aby se dosáhlo suchého vzorku. Vlhkost vzorků se následně spočítala dle vzorce (2).

## 7 Vyhodnocení výsledků měření

### 7.1 Měření elektrických vlastností dřevní štěpky

Měření elektrických vlastností proběhlo čtyřikrát a naměřené hodnoty jsou:

Tabulka 13: Měření elektrických vlastností při mokrém stavu po odkapání

Vzorek >5 mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz		t <sub>p</sub>	t <sub>v</sub>		
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	21,6°C	21°C		
1.	2,11	40,04	9,77	25,66	3,35	21,09	2,20	14,73	0,89	17,06	0,64				
2.		40,16	9,88	25,91	3,40	21,41	2,24	14,94	0,91	16,87	0,64				
3.		40,08	9,84	25,83	3,38	21,35	2,22	14,91	0,91	16,82	0,64				
Průměr		40,09	9,83	25,80	3,38	21,28	2,22	14,86	0,90	16,92	0,64				
Vzorek 5-3,15 mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz				21,6°C	21°C
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D				
1.	2,02	40,09	10,58	25,82	3,59	21,29	2,36	14,78	0,98	17,01	0,72				
2.		35,46	9,76	23,30	3,27	19,42	2,13	13,67	0,87	15,78	0,64				
3.		36,16	9,76	24,14	3,43	20,31	2,14	13,81	0,90	15,99	0,66				
Průměr		37,24	10,03	24,42	3,43	20,34	2,21	14,09	0,92	16,26	0,67				
Vzorek 3,15> mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz		21,6°C	21°C		
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D				
1.	2,07	35,96	10,72	23,77	3,55	19,80	2,30	13,89	0,92	15,96	0,67				
2.		36,20	10,54	24,01	3,50	20,06	2,27	14,11	0,91	16,07	0,68				
3.		36,21	10,52	23,97	3,49	20,04	2,26	14,10	0,91	16,06	0,67				
Průměr		36,13	10,60	23,92	3,51	19,96	2,28	14,03	0,91	16,03	0,67				

C – Kapacita    D – Ztrátový faktor    t<sub>p</sub> – Teplota prostředí    t<sub>v</sub> – teplota vzorku



Tabulka 14: Měření elektrických vlastností po 1. sušení

Vzorek >5 mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz		t <sub>p</sub>	t <sub>s</sub>
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D		
1.	1,96	23,93	3,22	18,43	1,05	16,30	0,72	12,61	0,41	15,85	0,35	21,1°C	
2.		24,06	3,30	18,49	1,07	16,34	0,74	12,67	0,41	16,17	0,32		
3.		24,27	3,39	18,60	1,10	16,44	0,75	12,74	0,42	16,27	0,33		
Průměr		24,08	3,30	18,51	1,07	16,36	0,74	12,67	0,41	16,10	0,33	21,6°C	21,1°C
Vzorek 5-3,15 mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz			
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D		
1.	1,93	22,05	3,39	17,13	1,08	15,19	0,74	11,72	0,40	14,53	0,31		
2.		22,04	3,40	17,11	1,08	15,19	0,74	11,73	0,40	14,54	0,31		
3.		22,23	3,50	17,36	1,12	15,38	0,76	11,82	0,41	14,73	0,31		
Průměr		22,10	3,43	17,20	1,09	15,25	0,75	11,76	0,40	14,60	0,31	21°C	
Vzorek 3,15> mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz			
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D		
1.	1,97	22,49	3,90	17,60	1,23	15,51	0,83	11,88	0,43	14,79	0,33		
2.		22,83	3,90	17,59	1,23	15,50	0,83	11,90	0,43	14,78	0,33		
3.		22,84	3,93	17,59	1,24	15,52	0,84	11,88	0,44	14,75	0,33		
Průměr		22,72	3,91	17,59	1,23	15,51	0,83	11,89	0,43	14,78	0,33		

C – Kapacita    D – Ztrátový faktor    t<sub>p</sub> – Teplota prostředí    t<sub>v</sub> – teplota vzorku

Tabulka 15: Měření elektrických vlastností po 2. sušení

Vzorek >5 mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz		t <sub>p</sub>	t <sub>s</sub>
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D		
1.	1,75	21,56	2,52	16,65	0,87	14,85	0,63	11,56	0,39	15,11	0,31	20,9°C	
2.		21,55	2,53	16,66	0,87	14,80	0,62	11,56	0,39	15,11	0,31		
3.		21,66	2,52	16,71	0,87	14,80	0,62	11,56	0,39	15,11	0,31		
Průměr		21,59	2,52	16,67	0,87	14,82	0,62	11,56	0,39	15,11	0,31	21,6°C	
Vzorek 5-3,15 mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz			
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D		
1.	1,69	19,86	2,29	15,24	0,81	13,52	0,58	10,47	0,37	13,61	0,29		20,7°C
2.		19,82	2,30	15,23	0,81	13,52	0,59	10,49	0,37	13,59	0,30		
3.		19,72	2,33	15,18	0,81	13,47	0,59	10,45	0,37	13,57	0,29		
Průměr		19,80	2,31	15,22	0,81	13,50	0,59	10,47	0,37	13,59	0,29		
Vzorek 3,15> mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz			
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D		
1.	1,81	20,95	3,33	16,24	1,07	14,36	0,74	11,13	0,41	14,48	0,31		21,1°C
2.		20,96	3,33	16,25	1,07	14,37	0,74	11,13	0,41	14,49	0,31		
3.		20,95	3,34	16,25	1,07	14,37	0,74	11,14	0,41	14,49	0,31		
Průměr		20,95	3,34	16,25	1,07	14,37	0,74	11,13	0,41	14,49	0,31		

C – Kapacita    D – Ztrátový faktor    t<sub>p</sub> – Teplota prostředí    t<sub>v</sub> – teplota vzorku

Tabulka 16: Měření elektrických vlastností sušiny

Vzorek >5 mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz		t <sub>p</sub>	t <sub>s</sub>
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D		
1.	1,01	2,82	0,01	2,79	0,01	2,78	0,01	2,88	0,02	4,57	0,01	21,4°C	21,5°C
2.		2,83	0,01	2,79	0,01	2,78	0,01	2,89	0,02	4,56	0,00		
3.		2,83	0,01	2,79	0,01	2,78	0,01	2,89	0,02	4,56	0,01		
Průměr		2,82	0,01	2,79	0,01	2,78	0,01	2,89	0,02	4,56	0,00	21,5°C	21,4°C
Vzorek 5-3,15 mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz			
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D		
1.	0,99	2,82	0,01	2,78	0,01	2,77	0,01	2,94	0,02	5,02	0,00	21,5°C	21,4°C
2.		2,82	0,01	2,78	0,01	2,77	0,01	2,94	0,02	5,01	0,00		
3.		2,83	0,01	2,79	0,01	2,78	0,01	2,95	0,02	5,02	0,00		
Průměr		2,82	0,01	2,79	0,01	2,78	0,01	2,94	0,02	5,02	0,00	21,4°C	21,4°C
Vzorek 3,15> mm	Hmotnost	100 khz		500 khz		1 Mhz		5 Mhz		10 Mhz			
Měření	kg	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D	C [pF]	D		
1.	1,00	2,83	0,01	2,79	0,01	2,78	0,01	2,77	0,02	3,84	0,03	21,4°C	21,4°C
2.		2,83	0,01	2,79	0,01	2,78	0,01	2,77	0,02	3,84	0,03		
3.		2,24	0,01	2,79	0,01	2,77	0,01	2,79	0,01	4,02	0,03		
Průměr		2,63	0,01	2,79	0,01	2,78	0,01	2,78	0,01	3,90	0,03	21,4°C	21,4°C

C – Kapacita    D – Ztrátový faktor    t<sub>p</sub> – Teplota prostředí    t<sub>v</sub> – teplota vzorku

Po dokončení měření byla spočítána relativní vlhkost vzorků dle vzorce (2) a relativní permitivita pro každou frekvenci. Relativní permitivita se zjistila na základě vzorce pro výpočet kapacity, který po úpravě vypadá takto:

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot S} \quad (7)$$

$\epsilon_r$  – Relativní permitivita

$\epsilon_0$  – permitivita vakua

C – Kapacita

d – Vzdálenost mezi měřícími deskami na aparatuře

S – plocha měřící desky na aparatuře

Permitivita vakua je dána a je  $8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ . Plocha měřící desky je  $0,0225 \text{ m}^2$  a vzdálenost mezi deskami je  $0,1 \text{ m}$ .

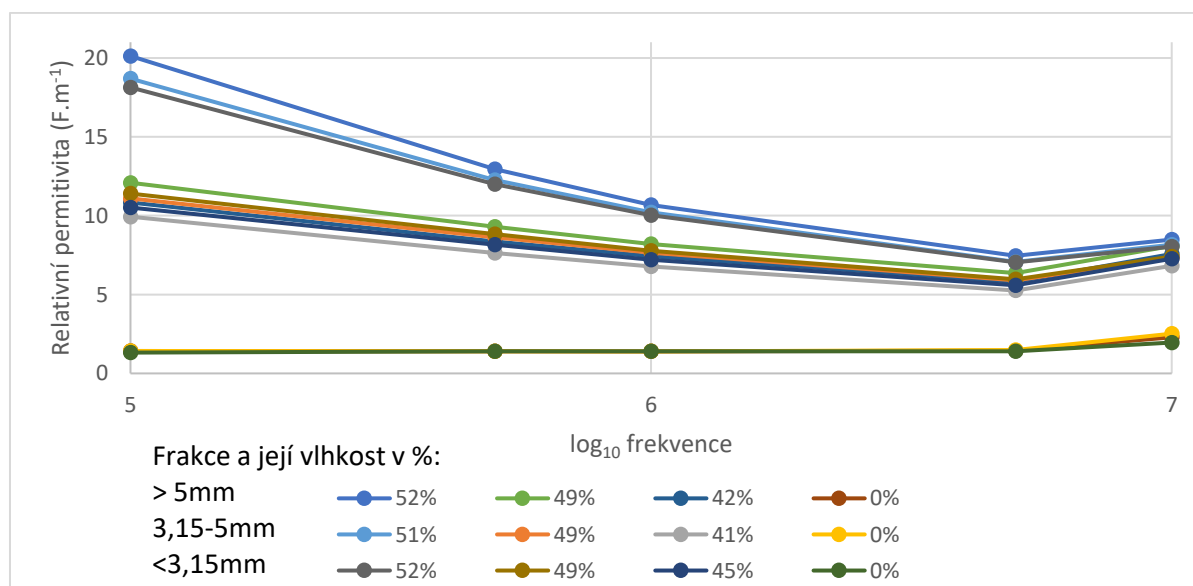
Tabulka 17: Vypočtené hodnoty relativní permitivity pro jednotlivé frakce

Frakce > 5 mm					
Vlhkost	100 khz	500 khz	1 Mhz	5 Mhz	10 Mhz
%	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]
52%	20,1253	12,95093	10,68329	7,458785	8,49232
49%	12,0894	9,289666	8,211356	6,36033	8,079207
42%	10,83751	8,36959	7,438238	5,803155	7,583605
0%	1,417927	1,400635	1,394417	1,449408	2,290642

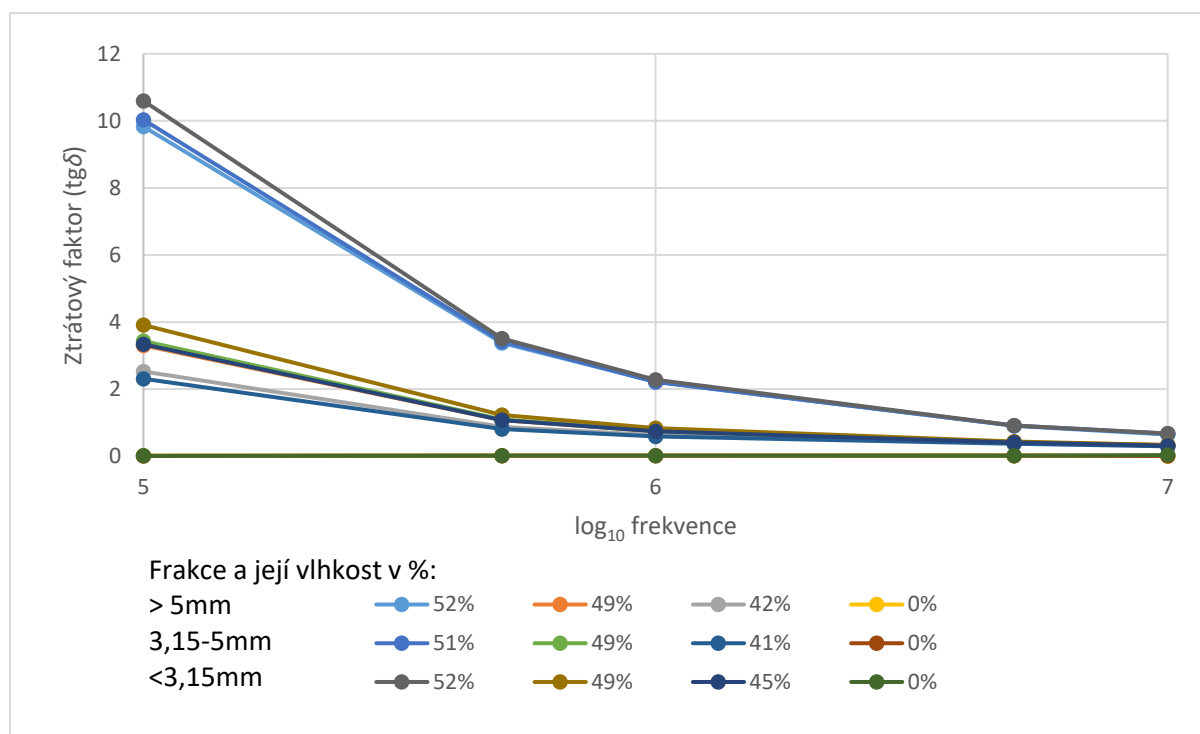
Frakce 3,15 - 5 mm					
Vlhkost	100 khz	500 khz	1 Mhz	5 Mhz	10 Mhz
%	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]
51%	18,69152	12,25822	10,21061	7,071439	8,162867
49%	11,09501	8,632433	7,655821	5,901204	7,328777
41%	9,936842	7,638202	6,778412	5,255851	6,822969
0%	1,415575	1,398294	1,393226	1,476715	2,518515

Frakce 3,15 > mm					
Vlhkost	100 khz	500 khz	1 Mhz	5 Mhz	10 Mhz
%	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]	$\epsilon_r$ [F.m <sup>-1</sup> ]
52%	18,13334	12,00548	10,02142	7,044501	8,047249
49%	11,40362	8,831226	7,785945	5,967128	7,41662
45%	10,51704	8,155689	7,211871	5,587814	7,272056
0%	1,320187	1,399744	1,393063	1,394561	1,957023

Obrázek 20: Závislost relativní permitivity na frekvenci při různé vlhkosti



Obrázek 21: Ztrátový faktor při různých frekvencích



Z grafů na obrázcích 20 a 21 je vidět, že obojí, jak relativní permitivita, tak i ztrátový faktor klesají se zvyšující se frekvencí až do frekvence 5MHz, kde hodnoty u permitivity stoupají. Relativní permitivita by zvyšující se frekvencí měla stále klesat, stejně jako ztrátový faktor. Stoupání hodnot kapacity u takto vysoké frekvence je nejspíše způsobeno vyzařováním energie do prostoru a efektivností vedení.

Klesající trend permitivity a ztrátového faktoru vykazuje dielektrickou disperzi v materiálu při různých frekvencích. Vysoké hodnoty relativní permitivity při nižší frekvenci (100 a 500 kHz) pro vysoký obsah vlhkosti lze připsat vysoké mobilitě dipólu pro kapilární (volnou) vodu obsaženou ve vzorcích a elektrické polarizaci.

Vysoké hodnoty ztrátového faktoru lze odůvodnit vysokou pohyblivostí dipólů vody, polarizací elektrod a zvýšením iontové a povrchové vodivosti. Vztahem mezi ztrátovým faktorem a iontovou vodivostí se již zabývali Magario a Yamaura v roce 1988 (Magario, Yamaura, 1988). Iontová ztráta je nepřímě úměrná frekvenci při nižších frekvencích a téměř se nevyskytuje při vyšších frekvencích v důsledku dipolární ztráty energie. Dielektrické vlastnosti se můžou uvést jako kombinace Ionických a dipolární ztrát. Změna permitivity a odpovídajícího ztrátového faktoru u měřených frekvencí ukazují, že klesající trend ztrátového faktoru je méně pravidelný než pokles u permitivity.

Naměřená data byla porovnáována s daty ze starších vědeckých článků, které se zabývaly stejnou problematikou. Již v roce 1975 se americký fyzik W.L. James (James, 1975) zabýval dielektrickými vlastnostmi dvou druhů dřeva, dubu a douglasky. Na rozdíl od této práce byly jako vzorky použity podélně a příčně nařezaná prkna o vlastní vlhkosti zhruba 25% a místo vlhkosti materiálu se měřila vlhkost prostředí, která se pohybovala od 0 % - 100 % vlhkosti. Hodnoty naměřené kapacity v této práci jsou vyšší než hodnoty pro stejné frekvence a o stejné teplotě, které naměřil tento fyzik ve své práci. Důvodem vyšších hodnot je, že místo vlhčení okolního prostředí se zvyšovala vlhkost samotných vzorků, dalším důvodem je, že místo homogenního materiálu je v této práci měřena nehomogenní štěpka o určité mezerovitosti.

Hodnoty pro kapacitu naměřené na přístroji mají stálý klesající trend, až na hodnoty naměřené při vysoké frekvenci. Měření při vysokých frekvencích je problematické a pro kalibraci naměřených hodnot o těchto frekvencích by bylo potřeba kalibrovat přístroj za pomoci absolutně čisté destilované vody, u které by se daly zjistit odchylky v kapacitě u vyšších frekvencí a na základě těchto odchylek přepočítat hodnoty u naměřených vzorků. Pro použití na zjištění vlhkosti štěpky by přístroj byl vhodný, neboť by měření probíhalo při menších frekvencích, kde jsou lépe vidět rozdíly v kapacitě suchého a mokrého vzorku.

## **7.2 Ekonomické zhodnocení**

Při porovnání sledovaných vlastností energetické štěpky s ostatními palivy, za pomoci metody pořadí, (Tabulka 1) se dřevní štěpka umístila jako nejlepší. Největší váhu při srovnávání měla výhřevnost, která je nejdůležitějším parametrem pro palivo. Pro cenu byla vybrána stejná váha jako pro emise z toho důvodu, že se stále zvyšují nároky na snižování emisí. Dále byly srovnávány náklady na koupi štěpky v porovnání s fosilními palivy (tabulka 18). Po přepočtu nákladů pro 1 MJ výhřevnosti, štěpka měla nejmenší náklady na pořízení. Palivo je v energetickém průmyslu největší variabilní nákladovou složkou. Mezi další významné variabilní nákladové složky patří dovoz paliva. Rozdíl v nákladech pro dovoz paliva cizí, či vlastní dopravou je značný. Štěpka je schopna snížit svoji vlhkost na 20 % samovolně. Při 20 % vlhkosti má výhřevnost zhruba  $12,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$ .

Pokud je potřeba dosáhnout vyšší výhřevnosti, je možnost štěpku před spálením vysušit, tím se ale zvyšují variabilní náklady o náklady spojené s energií potřebnou na sušení. Další významnou nákladovou složkou jsou náklady fixní. Nejvíce nákladný je pořízení spalovacího kotle, cena kotlů se pohybuje v řádu statisíců. Pokud bychom chtěli pořídit kotel na pouhé vytápění bytu, cena se bude pohybovat od 150 000 Kč až do 300 000 Kč pro kotle o výkonu 40 kW.

Tabulka 18: Srovnání nákladů na pořízení paliv

Palivo	Výhřevnost	Cena					Průměrná cena	Náklady na 1 MJ
	MJ.kg <sup>-1</sup>	kč.kg <sup>-1</sup>						kč.MJ <sup>-1</sup>
Černé uhlí - Kostka	32	4,98	4,99	5,5	4,29	5,79	5,11	0,16
Hnědé uhlí - Kostka	17,6	4,18	3,39	3,44	3,29	3,6	3,58	0,20
Dřevní štěpka	12,5	1,67	1,92	1,5	1,36	1,8	1,65	0,13

Výhřevnost štěpky je uvedena při 20% vlhkosti (přirozeně vyschlá štěpka)

Z porovnání dřevní štěpky s fosilními palivy je zřejmé, že dřevní štěpka má nejmenší náklady jako palivo. Tento fakt nám ale ještě neukazuje, že z hlediska celkových nákladů je její využití výhodnější. Proto byly vypočítány celkové náklady na výhřev bytu o pěti místnostech a rozdíl v nákladech byl spočítán v procentech. Náklady se vypočítaly pro dřevní štěpku a fosilní palivo s nižšími náklady na pořízení, černým uhlím. Pro co největší věrohodnost údajů byly vybrány spalovací kotle o stejném výkonu 40 kW. Vybranými kotli jsou Rojek KTP 40 kW se spotřebou paliva 8 081 kg/rok pro černé uhlí a automatický kotel EG-Multifuel 40 kW se spotřebou paliva 10 667 kg/rok. Dále se počítá s tím, že prodejna obou paliv je od budovy stejně vzdálená a tato vzdálenost je 13 km. Doprava paliva byla zvolena cizí a kapacita nákladového prostoru vozu je 8 t.

Tabulka 19: Náklady spojené s topením při použití černého uhlí

Nákladová položka	Investiční náklady		
	Cena za jednotku	Množství	Cena celkem v Kč
Kotel	72 000 Kč/kus	1 kus	72 000
Bojler	11 000 Kč/kus	1 kus	11 000
Čerpadlo	5 500 Kč/kus	1 kus	5 500
Tepelné vedení	100 Kč/m	50 metrů	5 000
Radiátory	3 800 Kč/kus	5 kusů	19 000
Instalatérské práce			10 000
<b>Celkem</b>			122 500
<b>Náklady spojené s provozem při desetiletém provozu</b>			
	Cena za jednotku	výpočet nákladů	Cena celkem
Černé uhlí	5 110 Kč/t	$m_s * n * P$	412 939
Doprava	35 Kč/km pro 1 vůz	$l * P * (m - V_k)$	5 005
<b>Celkem</b>			417 944

Tabulka 20: Náklady spojené s topením při použití dřevní štěpky

Nákladová položka	Investiční náklady		
	Cena za jednotku	Množství	Cena celkem v Kč
Kotel	210 000 Kč/kus	1 kus	210 000
Bojler	11 000 Kč/kus	1 kus	11 000
Čerpadlo	5 500 Kč/kus	1 kus	5 500
Tepelné vedení	100 Kč/m	50 metrů	5 000
Radiátory	3 800 Kč/kus	5 kusů	19 000
Instalatérské práce			10 000
<b>Celkem</b>			260 500
<b>Náklady spojené s provozem při desetiletém provozu</b>			
	Cena za jednotku	Výpočet nákladů	Cena celkem
Dřevní štěpka	1 650 Kč/t	$m_s * n * P$	176 006
Doprava	35 Kč/km pro 1 vůz	$l * P * (m - V_k)$	6 370
<b>Celkem</b>			182 376

$m_s$  - roční množství spáleného paliva pro daný kotel

$n$  - počet let provozu (10 let)

$P$  - cena v Kč

$l$  - vzdálenost domu od prodejny v km (13 km)

$m$  - celková hmotnost spáleného paliva po dobu 10 let v t ( $m = m_s * n$ )

$V_k$  - kapacita nákladního vozu (8 t)



Výnos z topení za použití dřevní štěpky se vypočítá jako:

$$Z = N_{\xi} - N_{\zeta} = (122\,500 + 417\,944) - (260\,500 + 182\,376) = 97\,568 \text{ Kč} \quad (8)$$

Kde  $N_{\xi}$  jsou celkové náklady pro černé uhlí a  $N_{\zeta}$  jsou celkové náklady pro dřevěnou štěpku. Celkové náklady se pro oboje paliva spočítají stejně a to tak, že se sečtou investiční a provozní náklady pro dané palivo.

Zjištěný výnos se následně přepočítá na procenta z celkových nákladů pro černé uhlí a tím se zjistí, kolik procent z celkových nákladů se dá obecně ušetřit, pokud se využije dřevní štěpka jako palivo pro topení.

Vzorec pro výpočet procent z celkových nákladů je:

$$Z_{\%} = \frac{Z}{N_{\xi}} = \frac{97\,568}{540\,444} = 18 \% \quad (9)$$

$Z_{\%}$  - Snížení nákladů v procentech

Investovat do kotle na bio palivo je výhodné, jelikož se dají snížit náklady spojené s topením až o 18 %, pokud se do té doby využívala fosilní paliva. Navíc jsou bio paliva podporována ministerstvem životního prostředí v podobě dotací při výměně kotle. Dotace nebyly ve výpočtech zahrnuty, jelikož se vztahují na fyzické osoby s rodinnými domy.

Výše dotací na nové kotle je následující:

- **70% způsobilých výdajů** v případě realizace kotle spalujícího pouze uhlí
- **75% způsobilých výdajů** v případě realizace kombinovaného kotle (uhlí + biomasa) nebo plynového kondenzačního kotle
- **80% způsobilých výdajů** v případě, že je projektem realizováno technologie z řady obnovitelných zdrojů (tepelné čerpadlo nebo kotel na biomasu)

V případě, že je výměna kotle realizována v obci, která byla Střednědobou strategií ochrany ovzduší označena jako prioritní území, je výše podpory navýšena o 5% (zdroj: <http://www.kotlikova-dotace.com/dotace.aspx>)

## 8 Závěr

Dřevní štěpka je významnou součástí energetického průmyslu a je stoprocentně obnovitelným zdrojem energie. Důležitými parametry dřevní štěpky jsou sypká hmotnost, výhřevnost a vlhkost.

Výhřevnost je nejdůležitějším parametrem z výše uvedených parametrů a je nejvíce ovlivněn vlhkostí. Vlhkost zvyšuje hmotnost a hustotu štěpky. Díky tomu se dá zjistit mnoha metodami. Nejsnadnější z nich jsou metody, které závisí na hustotě štěpky. To jsou metody zjišťující vlhkost štěpky pomocí rozdílů hmotností vzorků, nebo elektrické vodivosti.

Z výsledků měření elektrických vlastností dřevní štěpky je zřejmé, že voda obsažená ve štěpce má velký vliv na elektrické vlastnosti měřeného materiálu a tyto rozdíly se projevují při nižších frekvencích a se zvětšující se frekvencí tyto rozdíly klesají. Tohoto zjištění by se dalo využít pro zjištění vlhkosti dřevní štěpky bez nutnosti využití časově náročnějších přímých metod.

V porovnání s ostatními palivy je na tom dřevní štěpka z pohledu pro tepelné a elektrické využití hůře. Její výhřevnost je oproti fosilním palivům nižší. Přesto je tento druh paliva žádaný z toho důvodu, že jeho cena ku výhřevnosti je výhodnější než poměr cena/výhřevnost pro fosilní paliva. Další předností dřevní štěpky je, že produkuje o hodně méně emisí což je ukazatel, který je v této době hodně hlídáný a teplárny nemusí tolik investovat do čističů komínových plynů. Dřevní štěpka se řadí mezi tzv. biopaliva, což jsou paliva organického původu. Tento druh paliv je velice podporovaný, protože je obnovitelným zdrojem energie.

Přístroj je vhodný na měření vlhkosti dřevní štěpky, pokud bude měření probíhat při frekvencích menších než 5 MHz.

Energetické využití dřevní štěpky je, i přes vysoké počáteční náklady, výhodnější než využívání fosilních paliv, a to zejména pro fyzické osoby, které mohou využít státních dotací na pořízení bio kotlů.

## 9 Použitá literatura

- Baláš, M. , Moskalík, J. : *Měření vlhkosti paliv. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“*. VUT v Brně, 2009, ISBN 978-80-214-4027-2
- Gandelová, L. , Horáček, P. , Šlezingerová, J. : *Nauka o dřevě*. MZU v Brně, 2002, Vyd. 2. ISBN 80-71575-77-1
- Hansson, L. , Lundgren, N. , Antti, A.L. , Hagman, O.: *Microwave penetration in wood using imaging sensor. Measurement*. 2005, vol. 38, no. 1, s. 15-20. ISSN 0263-2241
- Hofman, M. *Přehled metod pro zjišťování parametrů dřevní štěpky*. Praha, 2015. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta.
- Chytrý, M. *Dřevní štěpka: obnovitelný zdroj energie, metodika kvantifikace zdrojů a předpoklady realizace*. Praha, 2007. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská.
- James, L.W.: *Dielectric properties of wood and hardboard: Variation with temperature, frequency, moisture content and grain orientation*. Madison, Wisconsin: U.S. government printing office, 1975. Dostupné z: [https://www.fpl.fs.fed.us/products/publications/specific\\_pub.php?posting\\_id=16098&header\\_id=p](https://www.fpl.fs.fed.us/products/publications/specific_pub.php?posting_id=16098&header_id=p)
- Magario, K., Yamaura, I.: *Temperature dependence of microwave dielectric properties in saline solution*. 1988, Denki Juoho Tushin Gakki Gihou Emcj, 88: 21-26.
- Nelson, S. O.: *Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications. The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. A Publication of the International Microwave Power Institute. 2010, vol. 44, no. 2, s. 98-113. ISSN 0832-7823.
- Nyström, J. , Dahlquist, E.: *Fuel. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants – a review*. Vol. 83, pp. 773–779. 2004.
- Pastorek, Z. ,Kára J. ,Jevič P.: *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004, 286 s. ISBN 80-86534-06-5.
- RRD [online]. 2018 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://rrd-topoly.cz/>
- Sacilik,K.–Colak,A.: *Determinaon of dielectric properes of corn seeds from 1 to 100 MHz*. PowderTechnology, 2010, Vol.203,pp.365–370
- Stupavský, V., Holý, T.: *Dřevní štěpka - zelená, hnědá, bílá*. Biom.cz [online]. 2010-01-01 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z : <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>. ISSN: 1801-2655.
- Zejda, J. , Tippner j. , Sebera V. , Koňasová E. , Dániel V.: *Mendelova univerzita v Brně: Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva* [online]. 2007 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?opora=554>

## 10 Přílohy

### 10.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Dřevní štěpka nasekaná nožovým štěpkovačem .....	7
Obrázek 2: Dřevní štěpka nadrcená kladivovým drtičem.....	10
Obrázek 3: Závislost výhřevnosti na obsahu vody (upraveno).....	20
Obrázek 4: Halogenová sušící váha .....	24
Obrázek 5: Zkušební aparatura ke stanovení vlhkosti destilační metodou .....	24
Obrázek 6: Ruční dotykový měřič.....	25
Obrázek 7: Nádoba ve skluzu .....	26
Obrázek 8: Nádoba v přesypu .....	26
Obrázek 9: Umístění mikrovlnného snímače .....	27
Obrázek 10: NIR Analyzer .....	28
Obrázek 11: Schéma měřiče vlhkosti využívající rentgenové zařízení .....	28
Obrázek 12: NMR - princip .....	29
Obrázek 13: Síťový analyzátor .....	30
Obrázek 14: Greisinger GTH 175/Pt .....	35
Obrázek 15: Haver EML digital plus.....	36
Obrázek 16: Ohaus CD - 11.....	36
Obrázek 17: Aparatura pro měření elektrických vlastností.....	37
Obrázek 18: GW Instek LCR-8110G .....	38
Obrázek 19: Memmert typ UFB500 .....	38
Obrázek 20: Závislost relativní permitivity na frekvenci při různé vlhkosti .....	44
Obrázek 21: Ztrátový faktor při různých frekvencích.....	45

## 10.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Vícekriteriální porovnání paliv metodou pořadí.....	1
Tabulka 2: Roční přírůstek sušiny – Topol.....	6
Tabulka 3: Roční přírůstek sušiny – vrba.....	6
Tabulka 4: Výhody a nevýhody mobilních drtičů ve srovnání se štěpkovači.....	11
Tabulka 5: Poměrná množství prvků v sušině tuzemského dřeva.....	12
Tabulka 6: Porovnání obsahů minerálních složek v dřevinách.....	14
Tabulka 7: Statická relativní permitivita vybraných materiálů při 20 °C.....	16
Tabulka 8: Převod hodnot relativní vlhkosti na absolutní vlhkost.....	19
Tabulka 9: Výhřevnost štěpky v závislosti na relativní vlhkosti.....	20
Tabulka 10: Sypná hmotnost štěpky z běžných druhů dřeva.....	21
Tabulka 11: Rozměry dle CEN/TS 15149-2.....	22
Tabulka 12: Přehled možných metod měření vlhkosti biomasy.....	23
Tabulka 13: Měření elektrických vlastností při mokřím stavu po odkapání.....	40
Tabulka 14: Měření elektrických vlastností po 1. sušení.....	41
Tabulka 15: Měření elektrických vlastností po 2. sušení.....	42
Tabulka 16: Měření elektrických vlastností sušiny.....	43
Tabulka 17: Vypočtené hodnoty relativní permitivity pro jednotlivé frakce.....	44
Tabulka 18: Srovnání nákladů na pořízení paliv.....	47
Tabulka 19: Náklady spojené s topením při použití černého uhlí.....	48
Tabulka 20: Náklady spojené s topením při použití dřevní štěpky.....	48