

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb



Bakalářská práce

**Technologie a technika výroby elektrické energie
z obnovitelných zdrojů energie**

Lenka Procházková

© 2021 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lenka Procházková

Procesní inženýrství
Technologická zařízení staveb

Název práce

Technologie a technika výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie

Název anglicky

Technology and technique of electricity production from renewable energy sources

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je seznámit se s problematikou výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie. Provést teoretický rozbor technologie a techniky výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie a na vybraných tuhých vzorcích stanovit základní palivářské vlastnosti.

Metodika práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců obnovitelných zdrojů energie s ohledem na tuhá biopaliva pro výrobu elektrické energie. Praktická část práce zahrnuje uskutečnit kvalitativní rozbor na vybraných vzorcích tuhé biomasy.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Přehled poznatků z literatury
4. Měření a dosažené výsledky
5. Diskuse a závěry
6. Seznam literatury
7. Přílohy

Doporučený rozsah práce

40 – 50

Klíčová slova

Biomasa, spalování, zplyňování, pyrolýza, kalorimetr, prvkový rozbor

Doporučené zdroje informací

Malaťák, J.; Jevič, P.; Vaculík, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. 2010, Powerprint, Praha, pp. 240, ISBN 978-80-87415-02-3
Malaťák, J.; Vaculík, P.: Biomasa pro výrobu energie. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 206 s., ISBN: 978-80-213-1810-6
Obroučka, K.: Termické zneškodňování odpadů. VŠB Ostrava, Ostrava 1997, 140 s.
Pastorek, Z.; Kára, J.; Jevič, P.: Biomasa – obnovitelný zdroj energie, nakladatelství FCC Public, Praha 2004, 284 str., ISBN 80-86534-06-5
Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2009/28/EC o podpoře užívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Štrasburk, 23.4.2009 (OR. en)

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 19. 11. 2019

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 10. 09. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci Technologie a technika výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.5.2021:

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu doc. Ing. Janu Malatákovi, Ph.D., za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této bakalářské práce. Současně bych chtěla poděkovat Katedře technologických zařízení staveb za umožnění měření v laboratořích Technické fakulty. A dále bych ráda poděkovala rodině a přátelům za podporu při studiu na vysoké škole.

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá problematikou výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie. V teoretické části jsou uvedeny všechny obnovitelné zdroje energie, jejich rozdělení a použití. Praktická část práce zahrnuje kvalitativní rozbory na vybraných vzorcích tuhé biomasy a stanovuje základní palivářské vlastnosti. Výsledkem práce je objasnění, jak se vyrábí elektrická energie a jak fungují elektrárny, jež využívají energii z obnovitelných zdrojů. Dále je vypracováno zhodnocení naměřených výsledků vzorků biomasy, které je v závěru porovnáno například s průměrnou výhřevností, dosahující hodnoty 18 MJ.kg^{-1} . Tato hodnota odpovídá požadavkům na využití ve zplyňovacích technologiích.

Klíčová slova: Biomasa, spalování, zplyňování, pyrolýza, kalorimetr, prvkový rozbor

Technology and technique of electricity production from renewable energy sources

Summary: The bachelor's thesis deals with the issue of electricity generation from renewable energy sources. The theoretical part lists all renewable energy sources, their distribution and use. The practical part of the work includes qualitative analyzes on selected samples of solid biomass and determines the basic fuel properties. The result of the work is to clarify how electricity is produced and how power plants that use energy from renewable sources work. Furthermore, an evaluation of the measured results of biomass samples is prepared, which is finally compared with, for example, the average calorific value, reaching a value of 18 MJ.kg^{-1} . This value corresponds to the requirements for use in gasification technologies.

Key words: Biomass, combustion, gasification, pyrolysis, calorimeter, elemental analysis

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce a metodika	2
3	Přehled poznatků z literatury	3
3.1	Obnovitelné zdroje	3
3.1.1	Energie světla	4
3.1.2	Energie větru	5
3.1.3	Energie vody.....	8
3.1.3.1	Vodní elektrárny	10
3.1.3.2	Slapové elektrárny	11
3.1.4	Geotermální energie	12
3.1.5	Energie biomasy	14
3.1.5.1	Rozdělení biopaliv	16
3.1.5.2	Zpracování biomasy	17
4	Měření a dosažené výsledky	20
4.1	Kůrovcová kalamitní situace a její řešení	20
4.2	Technologie pro zpracování dřevní biomasy	23
4.3	Zplyňování.....	24
4.3.1	Druhy zplyňovacích reaktorů	27
4.3.1.1	Zplyňovací reaktor s pevným ložem	28
4.3.1.2	Protiproudý reaktor „UPDRAFT“	28
4.3.1.3	Souproudý reaktor „DOWNDRAFT“	29
4.3.1.4	Reaktor s křížovým tokem.....	30
4.3.1.5	Zplyňovací reaktor s fluidním ložem	30
4.3.1.6	Reaktor se stacionární fluidní vrstvou	31
4.3.1.7	Reaktor s cirkulující fluidní vrstvou	31
4.3.1.8	Reaktor s unášivým proudem.....	31

4.3.2	Dodavatelé zplyňovacích zařízení dřevní hmoty.....	32
4.4	Popis měřených vzorků	33
4.5	Popis měření a měřicích zařízení	34
4.6	Výsledky a jejich hodnocení	38
4.6.1	Obsah vody	38
4.6.2	Popel a prchavá hořlavina	39
4.6.3	Výsledné hodnoty stanovení kvalitativních parametrů	41
4.6.4	Spalné teplo a výhřevnost	43
5	Diskuse a závěry	44
6	Seznam literatury.....	46
7	Seznam obrázků a tabulek	49
8	Přílohy.....	51

1 Úvod

V dnešní době, kdy populace na Zemi stále narůstá a lidstvo má stále větší životní nároky, pochopitelně stoupá i potřeba elektrické energie. Nikdo z nás už by si ani neuměl představit, jak by se nám žilo bez všech energií, jež každý den využíváme. Tato doba, ve které žijeme, je natolik moderní, že téměř vše, co denně používáme, potřebuje energii, aby to správně fungovalo.

Elektrická energie se vyrábí převážně z neobnovitelných zdrojů. Ty nejenže znečišťují životní prostředí, ale ceny ropy a uhlí se stále zdražují. Bohužel jsou předpoklady takové, že neobnovitelné zdroje se vyčerpají přibližně za několik desítek let, a proto by se – během několika let – měly tyto zdroje nahradit zdroji obnovitelnými.

Hlavním důvodem, proč v současnosti začít více využívat obnovitelné zdroje energie, je dekarbonizace české energetiky, ukončení využívání uhlí v Česku pro výrobu elektřiny a tepla v roce 2033–2038. Prvním problémem je, že tepelné elektrárny dodávají ročně zhruba 40 % vyrobené elektřiny. Druhý je však možná ještě důležitější: zajišťují totiž regulaci sítě a vyrovnávání změn ve spotřebě a v dodávkách elektřiny. Například vlivem bezvětřného počasí a zmíněného nedostatku stabilních zdrojů může dojít k blackoutu. Tyto situace, při kterých dojde k výpadku dodávky elektřiny, už nastaly v předchozích letech v různých zemích nejen Evropy, ale i po celém světě. Při výpadku elektřiny téměř vždy vznikne problém v přenosové soustavě a z toho vyplývá, že odstavování stabilních jaderných a uhelných bloků bez náhrady vede ke zvýšení rizika ohrožení stability sítě a případně i vzniku blackoutu. Jednou z cest je právě využití zplyňovacích jednotek jako zdrojů energie.

Tato metoda výroby elektrické energie pomocí zplyňovacích jednotek je v ČR zatím opomíjená. Cílem je právě zvýšit výrobu elektrické energie z obnovitelných biologických zdrojů, zvýšit diverzifikaci využití obnovitelných zdrojů energie. Jedná se o téměř bezemisní technologie, lze je aplikovat na širokou škálu biomasy, není závislá na počasí, zajišťuje dodávky suroviny v době zimní inverze.

2 Cíl práce a metodika

Úkolem bakalářské práce je seznámit se s problematikou výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie. Cílem práce je uskutečnit teoretický rozbor technologie a techniky výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie a na vybraných tuhých vzorcích stanovit základní palivářské vlastnosti. Dalším cílem je vysvětlení a zhodnocení technologií, používaných pro obnovitelné biologické zdroje energie.

Bude vypracován přehled řešené problematiky výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie. Zpracovávané informace byly čerpány z dostupné odborné literatury zapsané v seznamu literatury. V teoretické části bakalářské práce jsou představeny všechny obnovitelné zdroje a následná výroba nejen elektrické energie, ale i další produkty. Dále tato část bude obsahovat hlavní rozdělení elektráren a popis toho, na jakém principu každá elektrárna funguje. Pro lepší pochopení dané problematiky bude tato práce doplněna obrázky a schémata. Praktická část bakalářské práce bude realizována formou rozboru na vybraných vzorcích tuhé biomasy, z čehož vyplynou základní palivářské vlastnosti. V závěru bakalářské práce bude zprostředkováno porovnání na základě teoretických poznatků a skutečných výsledků měřených vzorků paliva z praktické části.

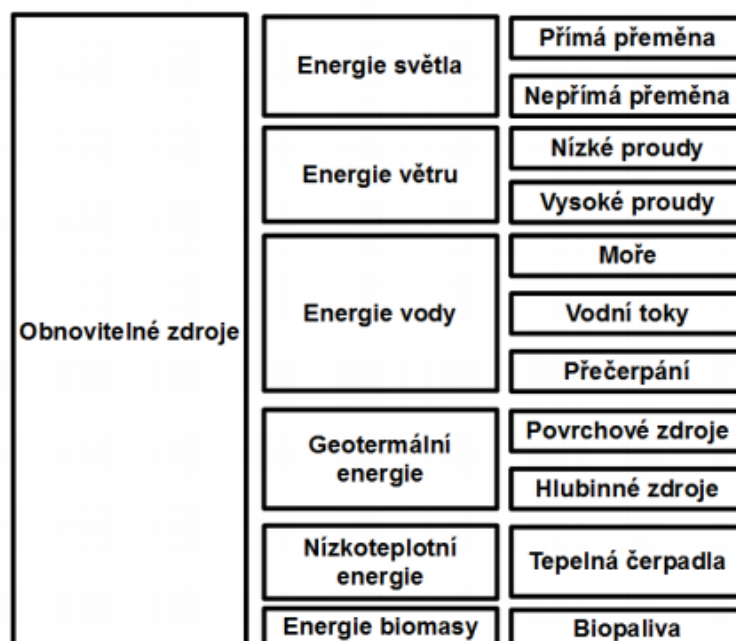
3 Přehled poznatků z literatury

3.1 Obnovitelné zdroje

„Obnovitelné přírodní zdroje mají schopnost se při postupném spotřebování částečně nebo úplně obnovovat, a to samy nebo za přispění člověka“ [1]. Tato definice vychází ze zákona o životním prostředí, který nám říká, že nehrozí její spotřebování.

Výroba elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů závisí především na povětrnostních vlivech, množství energie ukryté ve slunečním záření, větru i vodě, jež samozřejmě nemají každý den stejnou sílu. Rozdělení obnovitelných zdrojů je vyobrazeno na obrázku 1.

Hlavní výhodou obnovitelných zdrojů je, že nenarušují životní prostředí – na rozdíl od obnovitelných zdrojů. Dalšími výhodami jsou například bezodpadový provoz, podpora ekonomiky – dotace od státu a velké možnosti do budoucna. Získávání energie z obnovitelných zdrojů má i své nevýhody. Tou hlavní je, že hustota energie je nižší než u fosilních paliv a produkce elektrické energie je značně nestabilní [2].



Obrázek 1: Rozdělení obnovitelných zdrojů [4]

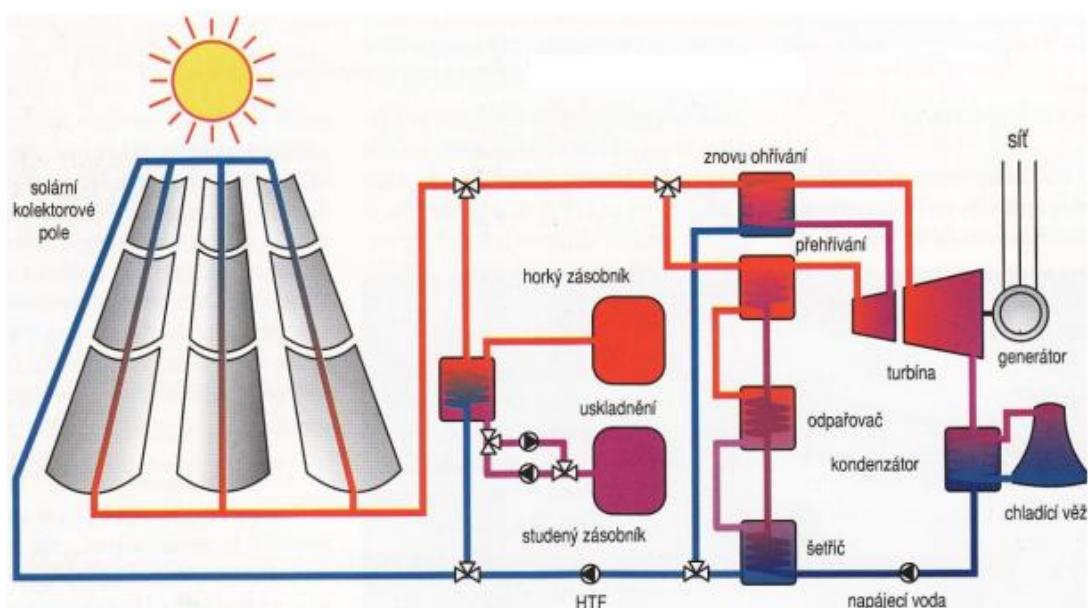
3.1.1 Energie světla

Energie, kterou vytváří slunce, je jediná energie, která neprodukuje žádné emise. Tato energie je pro Zemi jednou z největších příležitostí a mohla by do budoucna nahradit všechny elektrárny vyrábějící elektrickou energii z neobnovitelných zdrojů. Přibližně jedna třetina slunečního záření se odrazí od atmosféry zpět do meziplanetárního prostoru, zbývající část je využita pro lidskou potřebu [3].

Solární panely dokážou pohltit energii ze slunce, která vzniká „jadernými přeměnami v nitru Slunce, na Zemi je dopravena zářením (radiací) a přemění se beze zbytku“ [4].

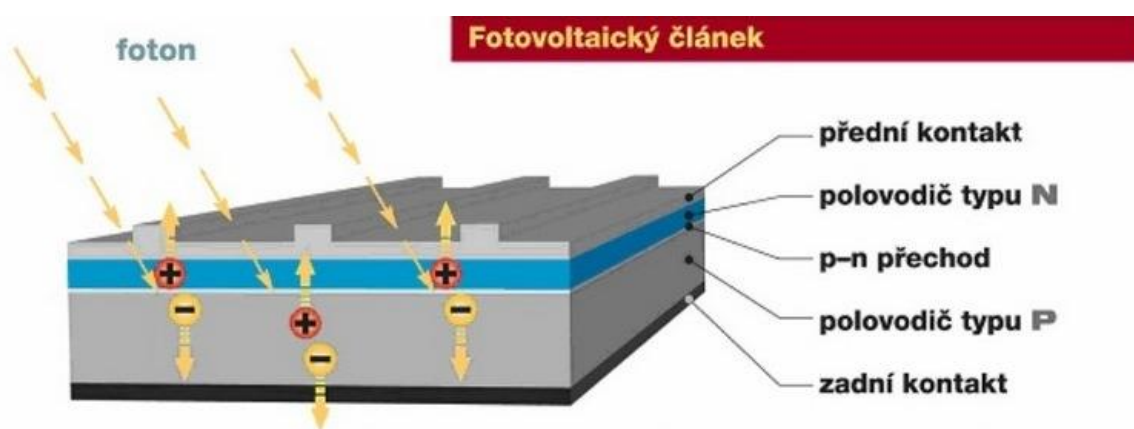
Máme dva typy slunečních elektráren. Více rozšířené jsou fotovoltaické elektrárny, které využívají fotovoltaický jev. Druhým typem jsou termální, respektive koncentrační sluneční elektrárny.

Na obrázku 2 můžeme vidět schéma termální elektrárny. Pracuje na principu slunečního záření, které je pohlcováno slunečními kolektory. Termální elektrárny se využívají hlavně k ohřevu vody nebo vytápění, ale také k výrobě elektrické energie. K tomu slouží nepřímá metoda. Ta využívá soustavu zrcadel, jež jsou sestavena do tvaru paraboly, sluneční paprsky tak míří do ohniskového absorberu. Tímto způsobem se může dosáhnout mnohem vyšší teploty než u slunečních kolektorů. Elektrárny využívající nepřímou metodu lze nazvat jako koncentrační elektrárny [5], [6].



Obrázek 2: Schéma sluneční termální elektrárny [6]

Častější jsou fotovoltaické elektrárny, které pomocí fotovoltaických článků vyrábějí elektrickou energii. Fotovoltaické články jsou umístěny v solárních panelech, jež musejí být vyrobeny z polovodičových materiálů, jelikož obsahují polovodičovou diodu, která obsahuje polovodiče typu N- katoda a polovodiče typu P- anoda. Polovodič typu N obsahuje přebytek elektronů a polovodič typu P naopak obsahuje přebytek tzv. volných míst (Obrázek 3). Díky těmto vlastnostem vzniká rozhraní, které se nazývá P-N přechod. Ten slouží k tomu, aby proud šel pouze jedním směrem. Fotovoltaický jev vznikne tak, že na fotočlánek dopadne sluneční paprsek, což vyvolá uvolnění nábojů, díky kterým vznikne elektrické napětí a při uzavřeném elektrickém obvodu protéká proud [5], [7].



Obrázek 3: Schéma fotovoltaického článku [7]

Nejčastějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík, protože se v přírodě nachází až v 99% čistotě. Tyto články jsou do panelu řazeny sério-paralelně. Panel se skládá z duralového rámu a je pokryt speciálním tvrzeným sklem, které panel chrání před nepříznivým počasím [5].

3.1.2 Energie větru

První využití větrné energie spadá už do 3. století před naším letopočtem. Bylo to v Egyptě, kde byl používán větrný motor s vodorovnou osou. Ve 13. století v Holandsku začala výstavba větrných mlýnů, využívaných především k mletí obilí, čerpání vody a zpracování dřeva. Začátek výroby elektrické energie pomocí větrné energie se pojí s 19. stoletím, ale díky objevení parního stroje došlo k útlumu. Největší rozmach větrných elektráren je zaznamenán v současné době,

a to především kvůli tomu, aby se omezilo využívání fosilních paliv pro výrobu elektrické energie [8].

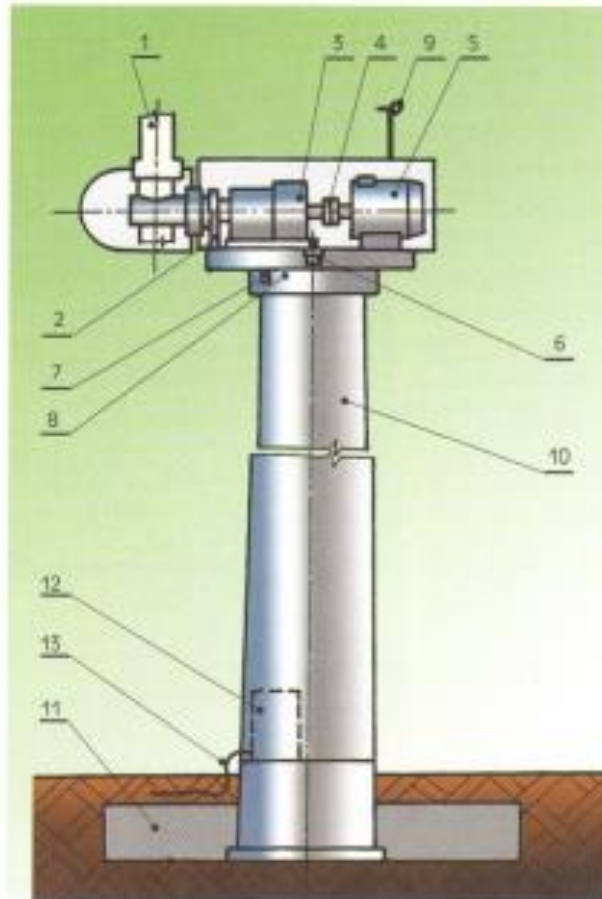
Vznik větru závisí na ohřevu zemského povrchu, který je nerovnoměrný a je ohříván slunečním zářením. Díky ohřátému povrchu se zároveň ohřeje i vrstva vzduchu, jež je těsně nad povrchem, a teplý vzduch začne stoupat nahoru. Tlakové rozdíly v zemské atmosféře vznikají kvůli rotaci Země a střídání dne a noci. Vítr vzniká tím, že se vyrovnávají tlakové rozdíly, fouká směrem od tlakové výše k tlakové níži. „Kolem tlakové níže na severní polokouli jde spinální pohyb proti směru hodinových ručiček, u tlakové výše ve směru hodinových ručiček“ [8].

Větrná elektrárna funguje na principu otáčení větrné turbíny. Otáčení způsobují aerodynamické síly, které vytvářejí rotační mechanickou energii. Tato energie je generátorem převedena na elektrickou energii. Lopatky větrné turbíny jsou speciálně navrženy, velmi podobná jsou křídla letadla. „Se vzrůstající rychlostí vzdušného proudu rostou vztahové síly s druhou mocninou rychlosti větru, a s třetí mocninou energie vyprodukovanou generátorem. Je proto třeba zajistit efektivní a rychle pracující regulaci výkonu rotoru tak, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení větrné elektrárny“ (Obrázek 4), [9].

Větrné elektrárny rozdělujeme podle jejich výkonu na:

- malé,
- střední,
- velké.

Hlavním rozdílem u těchto elektráren je, že elektrárny malých výkonů, konkrétně do 10kW, využívají synchronní generátory. Další důležitou součástí je usměrňovač, který je důležitý pro napájení akumulátorové baterie – na rozdíl od elektráren pro střední a velké výkony, jež využívají asynchronní motory s kotvou na krátko. Velkou výhodou asynchronních motorů je hlavně jejich spolehlivost, nenáročná údržba a nízké pořizovací náklady [8].



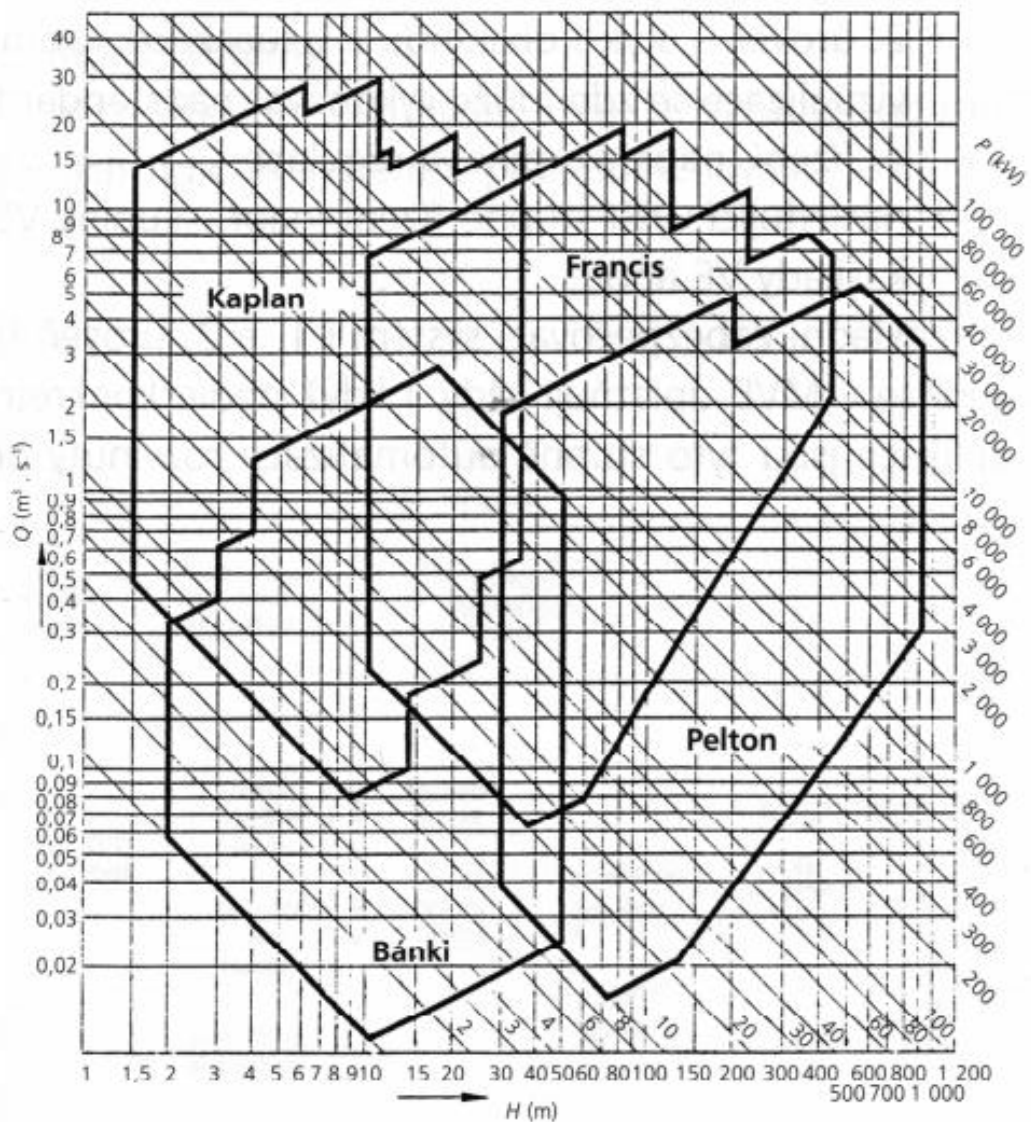
Obrázek 4: Schéma větrné elektrárny [2]

- 1 – rotor s rotorovou hlavicí
- 2 – brzda rotoru
- 3 – převodovka
- 4 – spojka
- 5 – generátor
- 6 – servopohon natáčení strojovny
- 7 – brzda točny strojovny
- 8 – ložisko točny strojovny
- 9 – čidlo rychlosti a směru větru
- 10 – několikadílná věž (stožár, sloup) elektrárny
- 11 – betonový základ
- 12 – elektrorozvaděče silnoprúdeho a řídicího obvodu
- 13 – elektrická přípojka

3.1.3 Energie vody

Voda je nezbytnou součástí našeho života, tvoří více než 70 % naší planety Země. Na Zemi se vyskytuje převážně v kapalně podobě, ale také v pevném a plynném skupenství. Voda je pro výrobu elektrické energie využívána především v kapalně podobě. Celkem 97 % vodní plochy tvoří oceány a moře. Tuto vodní energii zpracovávají slapové neboli přílivové elektrárny. Dalším typem jsou vodní elektrárny, které se dělí na klasické přehradní a přečerpávací.

Hlavním prvkem vodní elektrárny je vodní turbína, pomocí které se vyrábí elektrická energie. Elektrárny na vodní energii mají různé vlastnosti a parametry, například spád, otáčky, průtok, výkon, a podle těchto parametrů se vybírá určitý typ turbíny. Ten se dá určit pomocí nomogramu, který lze vidět na obrázku 5 [4].



Obrázek 5: Oblast použití základních typů turbín [8]

Rozdělení turbín z hlediska způsobu přenosu energie:

- rovnotlaké,
- přetlakové.

Jak lze odvodit z názvu, rovnotlaká turbína má tlak stále stejný (i při průchodu vody turbínou), naopak u přetlakových turbín se tlak mění, kdy před oběžným kolem je větší než za ním. U rovnotlakých neboli akčních turbín se využívá kinetická energie vody, u přetlakových (reakčních) turbín i tlaková energie vody [12].

Nejčastějšími typy vodních turbín jsou Francisova, Kaplanova, Peltonova a Bánkiho. Tyto turbíny jsou vyobrazeny na obrázku 6.

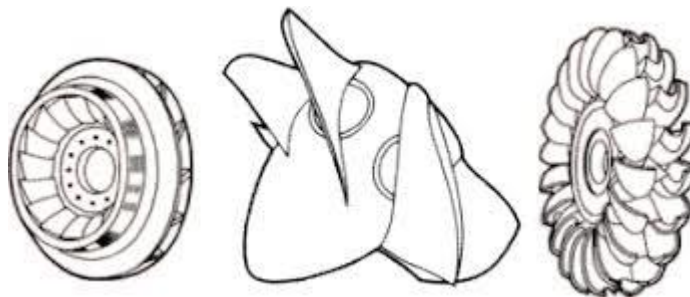
Nejčastěji používaným typem je Francisova turbína. Řadí se do skupiny moderních přetlakových turbín. Používá se hlavně pro velké průtoky a spády. Výhodou Francisovy turbíny je i možnost využití v režimu čerpadlové turbíny především pro přečerpávací elektrárny. V tomto případě se turbína chová jako čerpadlo. Natáčivé rozváděcí lopatky zajišťují regulaci této turbíny.

Kaplanova turbína má tvar vrtule a její konstrukce je značně složitější než v případě již zmíněné Francisovy turbíny. Tato turbína se řadí do přetlakových axiálních turbín. Této turbíny se využívá pro malé spády o velkých průtocích, jež nejsou konstantní. Regulace je zajištěna pomocí natáčecích lopatek oběžného kola. Kaplanova turbína má jednu velkou výhodu, a sice vysokou účinnost, protože ji lze používat pro širokou škálu průtoků.

Mezi rovnotlaké turbíny patří turbína Peltonova. Tlaková energie vody se zcela mění na kinetickou energii. Její lopatky mají lžičkový tvar, díky němuž je tato turbína vhodná pro velké spády. Peltonova turbína k regulaci využívá regulační jehlu, která je umístěna v dýze. Voda je přiváděna k turbíně potrubím kruhového průřezu, to vede k jedné, nebo více dýzám.

Bánkiho turbína, stejně jako Peltonova turbína, patří do rovnotlakých turbín. Pro svou konstrukční jednoduchost je vhodná pro malé elektrárny s malým či středním spádem. Regulace této turbíny spočívá v uzavírání sekcí pomocí

regulačních klapek. U Bánkiho turbíny voda prochází přes lopatky dvakrát, při vstupu do oběžného kola a následně i při jeho opuštění [12].



Obrázek 6: Vodní turbíny – Francisova, Kaplanova, Peltonova [13]

3.1.3.1 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny jsou nejvyužívanější elektrárny k výrobě elektrické energie z kategorie výroby energie z obnovitelných zdrojů. Elektrárny z vodních toků můžeme dělit hned několika způsoby:

Podle instalovaného výkonu:

- malé (do 10 MW),
- střední (do 100 MW),
- velké (nad 100 MW).

Podle využívaného spádu:

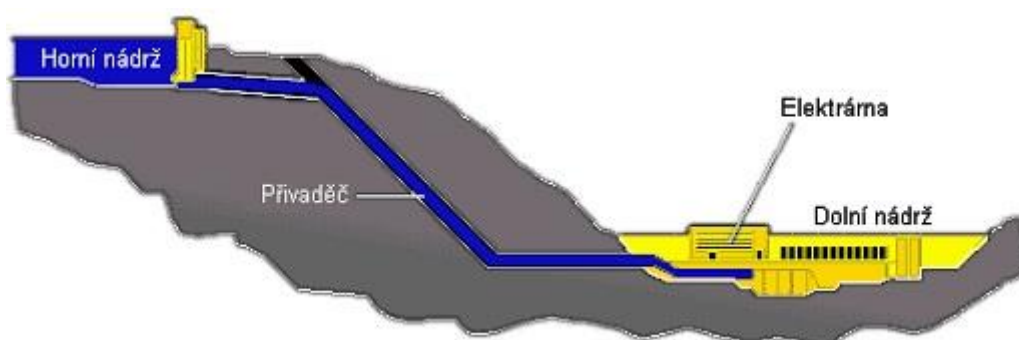
- nízkotlaké (do 20 m),
- středotlaké (od 20 do 100 m),
- vysokotlaké (nad 100 m).

Další možností je rozdělení podle využití vodního toku. První jsou průtočné vodní elektrárny, které se ještě dělí na jezové a derivační. Průtočné vodní elektrárny využívají přirozený vodní tok. Jezová vodní elektrárna patří do skupiny nízkotlakých vodních elektráren, protože spád u těchto elektráren se pohybuje mezi 10–20 m. Princip činnosti jezové elektrárny spočívá ve využití jezu pro zvýšení hladiny a soustředění spádu. Derivační elektrárny využívají derivačního přivaděče, což může být potrubí, kanál nebo štola. Derivační přivaděč odvádí vodu z koryta řeky přímo k turbíně vodní elektrárny. Poté je voda odpadním kanálem vrácena zpět

do řečiště. Derivačního kanálu se využívá takovým způsobem, aby se část řeky zkrátila, a tím se zvýšil využívaný spád [12].

Druhým typem jsou elektrárny akumulární neboli přehradní. Umístěny jsou většinou pod přehradou a jsou spojeny tlakovým přivaděčem. Velkou výhodou přehrad je ochrana před povodněmi a využitelnost jako zdroj velkého množství vody pro průmyslové využití.

Posledním typem jsou přečerpávací elektrárny. Mají dvě nádrže o nestejně výšce, spojené potrubím, jímž proudí voda z vyšší nádrže do nižší, a tím se vyrábí potřebná elektrická energie (Obrázek 7), [12].



Obrázek 7: Schéma přečerpávací elektrárny [14]

3.1.3.2 Slapové elektrárny

Dalším typem vodní elektrárny je elektrárna slapová neboli přílivová (v rámci rozdělení podle využití vodního toku). Tento typ elektrárny pracuje na principu slapového jevu. Slapové jevy vznikají na základě gravitace a otáčení Země a způsobují příliv a odliv. Tato kinetická energie vody je využívána pro výrobu elektrické energie přílivovými elektrárnami. „Energie přílivu může být využívána dvěma způsoby: ve speciálních vodních nádržích v mořských zátokách nebo v ústí řek s vysokým přílivovým rozsahem nebo při využití přílivových proudů na otevřeném moři“ [8]. Přílivové elektrárny nejsou tolik využívány, protože musejí být postaveny na určitém místě s vhodnými podmínkami pro výrobu energie. Hlavní a zároveň velkou výhodou, kterou mají všechny elektrárny, je velmi spolehlivý zdroj energie – díky tomu, že jsou slapové jevy dobře předvídatelné [12].

3.1.4 Geotermální energie

Mezi další obnovitelné zdroje řadíme i geotermální energii. Vzniká působením tepelné energie zemského jádra a můžeme ji zaznamenat v různých formách, například jako horké prameny, gejzíry, parní výrony a také erupce sopek. Geotermální energie se využívá především pro vytápění, ale i pro výrobu elektrické energie pomocí geotermálních elektráren [10].

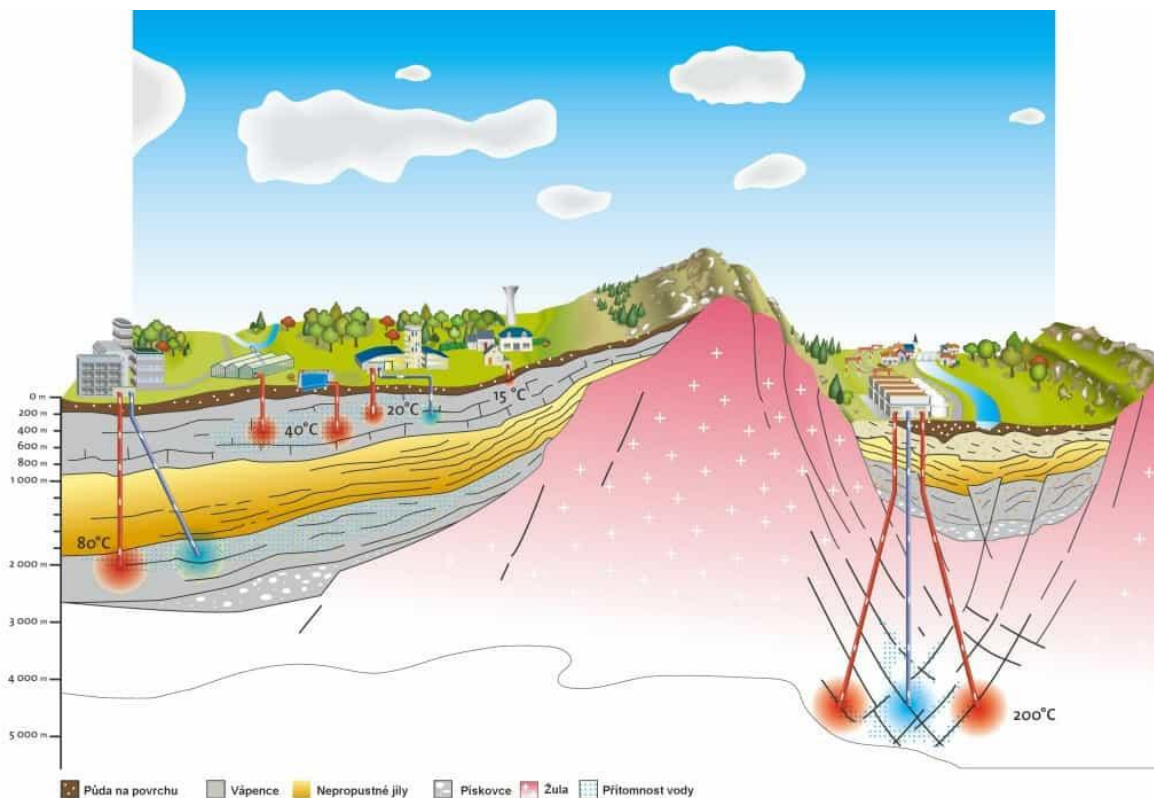
Zdrojů geotermální energie může být hned několik. Prvním z nich je původní teplo zemského jádra, kdy tato energie vznikla spolu s vytvářením samotné planety. Druhým je rozpad radioaktivních prvků. Týká se to hlavně chemického prvku uranu, jenž je hlavním zdrojem tepelné energie Země již od jejího vzniku. Dalšími radioaktivními prvky jsou thorium a radioaktivní draslík. Třetím zdrojem jsou fyzikálně chemické reakce probíhající v zemské kůře, při kterých se uvolňuje teplo, například oxidace nebo rekrystalizace minerálů. Čtvrtým způsobem, kterým se získává geotermální energie, je pohyb tektonických desek. Pátý a zároveň poslední způsob je energie ze slapových sil. Tato energie vzniká díky přílivu a odlivu, kdy voda naráží o pevninu [10].

Hlavním parametrem pro geotermální elektrárny je teplota. Směrem k jádru teplota roste, ale také záleží na teplotní vodivosti hornin, tektonické aktivitě a dalších vlivech. Dalším parametrem je tepelný gradient, který „udává přírůstek teploty za jednotku hloubky“. Posledním parametrem je tepelný tok. Z něj můžeme odvodit tepelný gradient, protože tepelný tok „představuje množství tepla procházející jednotkou plochy za jednotku času“ [10].

Pro využití geotermální energie máme hned několik metod. První z nich je Hot Dry Rock. Jak už je znát z názvu, tato metoda je založena na principu práce se suchými horninami nepropustnými pro kapaliny. V těchto horninách jsou uměle vytvořeny praskliny nebo jsou drceny a díky tomu vzniká prostor pro tepelný výměník. Dále je potřeba injektážní vrt, do něhož je vháněna voda, aby odebírala teplo okolní hornině. Voda zůstává v kapalném stavu, přestože teplota přesahuje teplotu 100 °C, a to díky vysokému tlaku. Poté je tepelná energie odebrána ve výměníku nebo je přeměněna v páru. Druhou metodou je Hot Fractured Rock, v překladu horké porušené horniny. Metoda Hot Fractured Rock bývá využívána

především v oblastech, kde se vyskytují tektonická pásma. U této metody je nutné prozkoumání zemní struktury a následná úprava horniny [10].

Prvním využitím geotermální energie je vytápění pomocí tepelných čerpadel. Ta fungují na principu vrtů (Obrázek 8).

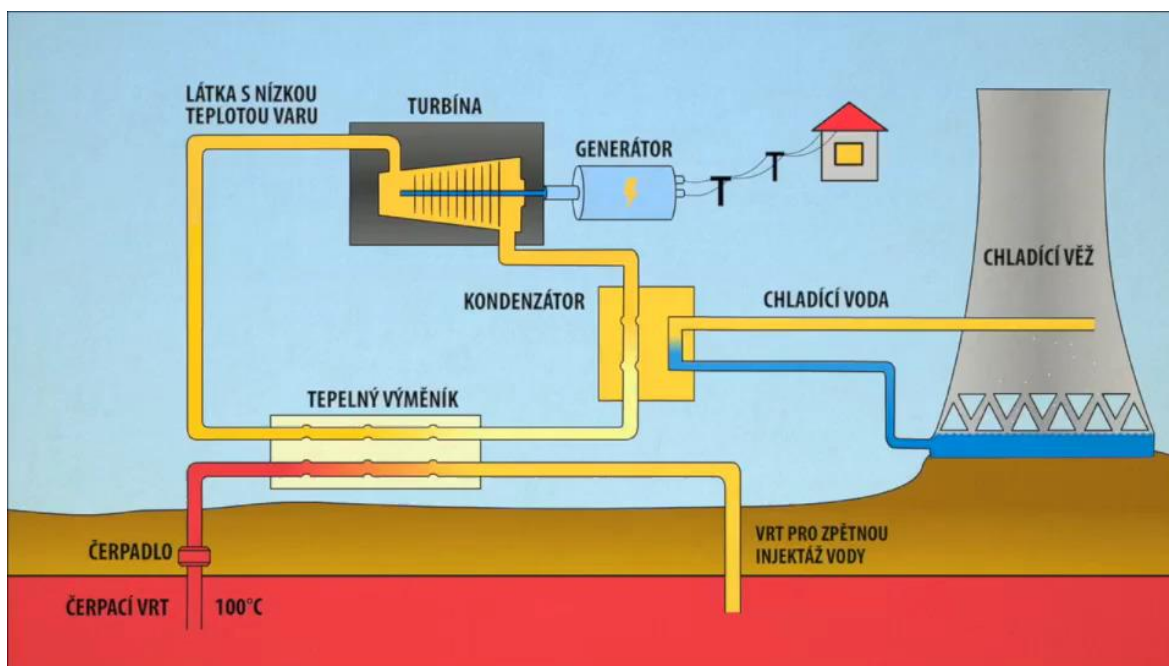


Obrázek 8: Schéma využití geotermální energie pro vytápění [10]

Další možností využití je přeměna na elektrickou energii pomocí geotermálních elektráren. Na světě existují hned tři typy geotermálních elektráren – Dry Steam, Flash Cycle a Binary Cycle. Nejrozšířenějším z nich je Flash Cycle. Tento typ geotermální elektrárny využívá vody, jež má vyšší teplotu než 160 °C. Nejprve je voda přivedena k varu, toho se docílí změnou tlaku. Následuje přeměna ve vodní mokrou páru, která následně putuje do separátoru. Tam se mokrá pára rozdělí na páru a mineralizovanou vodu. Takto vzniklá pára následně pohání turbínu (Obrázek 9), [10].

Další typ je Dry Steam, kde se využívá páry v tektonických oblastech pro pohon turbíny. Poslední jsou binární elektrárny. Najdeme je spíše v oblastech, kde jsou nízké a střední teplotní geotermální zdroje energie. Principem elektráren typu Dry

Steam je ve využití teponosného média s nízkým bodem varu a vysokým tlakem par při nízkých teplotách, nejčastěji organických kapalin, kterými mohou být například propan, isobutan a freon. Ve výměníku je ohříváno teponosné médium. Díky nižší teplotě varu se teponosné médium odpařuje i při nízkých teplotách. Tyto páry jsou dále využity k pohonu turbíny [10].



Obrázek 9: Schéma geotermální elektrárny [11]

Hlavními výhodami geotermální energie jsou za prvé stálá produkce a za druhé šetrnost k naší planetě. Nevýhodou je finanční náročnost při pořizování geotermálních elektráren, nejdražší je realizace hloubkových vrtů [10].

3.1.5 Energie biomasy

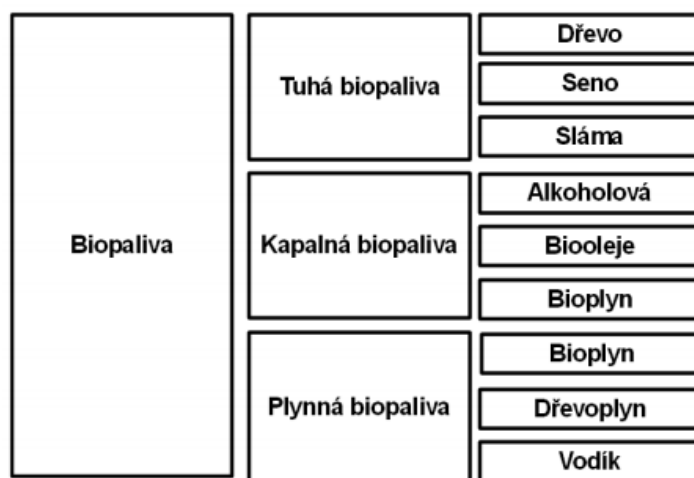
Když se řekne biomasa, každý člověk si zajisté představí něco jiného. V knihách či na internetu najdeme hned několik definic, co je to biomasa.

Definice je tedy následující: „Biomasa je celkový objem všech organismů vyskytujících se v určitém okamžiku na určitém místě. Jedná se o rostliny, živočichy, bakterie i houby“ [2].

Důležitým parametrem pro biomasu je, aby byla energeticky využitelná. Nejčastější a nejvíce využívanou biomasou je rostlinná biomasa. Rostliny používají energii

ze slunečního záření, vodu a oxid uhličitý, ze kterých fotosyntézou vyrábějí organické látky. V těch je uložena energie ze slunce, jež s rostoucími ztrátami putuje dále potravním řetězcem ke konzumentům (býložravci, masožravci) až k mrchožroutům. Rostliny obsahují velké množství energie a tu lze využít nejen jako zdroj potravy, ale také jako zdroj tepla. To už se jedná o biomasu, jeden ze zdrojů obnovitelných energií [2].

Z biomasy vzniká biopalivo, které lze rozdělit na tuhá, kapalná a plynná biopaliva, viz obrázek 10.



Obrázek 10: Rozdělení biopaliv [4]

Na obrázku 11 je zobrazeno využití biomasy a její zpracování.

Skupina	Technologie	Produkty	Výstupy
Přímá přeměna	Spalování		Teplo, elektřina
Chemické přeměny	Zplyňování	Olej, plyn, dehet, metan, čpavek, metanol	Elektřina, teplo, pohon vozidel
	Rychlá pyrolýza		
Chemické přeměny ve vodním prostředí	Zkapalňování	Olej	
	Esterifikace	Metylester řepkového oleje (MEĚO)-bionafta	Pohon vozidel
Biologické procesy	Anaerobní digesce	Bioplyn, metan	Elektřina, teplo, pohon vozidel
	Alkoholové kvašení	Etanol	Pohon vozidel
	Kompostování		Teplo (z chlazení kompostu)

Obrázek 11: Skupiny zpracování biomasy [4]

3.1.5.1 Rozdělení biopaliv

Prvním zástupcem biopaliv jsou biopaliva v tuhém skupenství, která v této tuhé formě mohou být přepravována, skladována, dále přichystána k energetickému využití a následovně využita jako obnovitelný zdroj k výrobě energie. Příklady tuhých biopaliv:

- dřevo v různých formách: polena, štěpka, brikety, pelety, piliny,
- sláma, dnes již také ve formě briket a pelet,
- seno ve formě briket či pelet,
- vysušené komposty pro vytopny menších výkonů [4].

Dalším zástupcem biopaliv jsou biopaliva v kapalném skupenství. Příklady kapalných biopaliv:

- Alkoholová biopaliva:
 - Bioethanol je ethanol vyráběný z rostlin obsahujících větší množství škrobu a sacharidů, nejčastěji z kukuřice, obilí, brambor, cukrové třtiny a cukrové řepy. Široké uplatnění má jako automobilové palivo zejména v Brazílii.
 - Biomethanol je methanol vyrobený z biomasy. Jeho produkce je zatím velmi neekonomická a methanol je silně jedovatý.
 - Butanol lze vyrobit složitou fermentací biomasy. Může být použit přímo v existujících benzínových motorech a je méně korozivní než ethanol, ale je také jedovatý.
- Biooleje, které se využívají pro naftové motory:
 - Rostlinný olej.
 - Použitý, např. fritovací olej.
 - Bionafta získávaná transesterifikací rostlinných olejů a živočišných tuků.
- Zkapalněná plynná biopaliva:
 - Bioplyn a dřevoplyn – tato dvě plynná biopaliva lze přeměnit na kapalnou uhlovodíky pomocí Fisher-Tropschovy syntézy. K výrobě dřevoplynu se používá celá plodina, což zvyšuje energetický výnos. Navíc je jedno, z jakých rostlin zdrojová biomasa pochází, takže není nutné pěstovat monokultury jediné plodiny [4].

Posledním zástupcem biopaliv jsou biopaliva ve skupenství plynném. Příklady plyných biopaliv:

- Bioplyn: hlavní složkou je hlavně methan a dále oxid uhličitý, který se tvoří přirozeným rozkladem na skládkách odpadů nebo v zemědělství.
- Dřevoplyn, který se skládá z oxidu uhelnatého a vodíku, vyrábí se zplyňováním biomasy.
- Vodík, který se vyrábí štěpením jakéhokoliv uhlovodíkového biopaliva.
- Vodík, který se vyrábí parním reformingem z jakéhokoliv uhlovodíkového biopaliva [4].

3.1.5.2 Zpracování biomasy

Nejprve, ještě před samotným zpracováním, se produkty musejí upravit mechanickými procesy, aby vznikla finální podoba biomasy. První úpravou je řezání, využívané pro zpracování dřeva a řeziva, které se dále využívá jako palivo. Další často používanou úpravou je drcení a štěpkování, využívá se pro výrobu briket a pelet. Poslední možnou úpravou je lisování oleje [15].

Prvním typem zpracování biomasy je spalování, které je jedním z nejdéle a nejvíce využívaných způsobů, jimiž lze získat energii z biomasy. Při spalování dochází k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny a při následné oxidaci se uvolňuje energie, oxid uhličitý a voda. Při spalování nedochází k produkci oxidu uhličitého, což je velkou výhodou, a proces spalování je tedy šetrný k životnímu prostředí, nezvyšuje hustotu oxidu uhličitého v atmosféře, tudíž ani nepřispívá ke skleníkovému efektu.

Proces spalování má čtyři fáze, a sice:

1. fáze – sušení: v materiálu se postupně snižuje obsah vody a začne se zahřívat,
2. fáze – pyrolýza: po dosažení správné teploty (cca 200 °C) se materiál postupně rozkládá na hořlavé plyny,
3. fáze – spalování plyné složky: hoření plyných složek prodlužuje plamen a zvyšuje teplotu plyných spalin,

4. fáze – spalování pevných látek: dohořívají pevné látky, vzniká oxid uhelnatý (CO), který se oxiduje na oxid uhličitý (CO₂).

Důležitým faktorem pro spalování biomasy je dobrý přístup kyslíku ve spalovacím zařízení, dále vysoký obsah sušiny a provozní teplota nad hranicí zápalné směsi materiálu [2].

Dalším typem je karbonizace, jež se řadí do termických procesů. Karbonizací se vyrábí dřevěné uhlí. Lze ji považovat za nejstarší metodu zušlechťování dřeva pro energetické účely. Nejprve se využíval tepelný rozklad bez přístupu vzduchu. To bylo nevhodné, ekologicky nevhodné. V současnosti se už využívá suché destilace v karbonizačních pecích a retortách. Při karbonizaci vzniká oxid uhelnatý, toxické a karcinogenní látky. K výrobě 1 tuny dřevěného uhlí je potřeba zhruba 10 tun dřeva [15].

Mezi termické procesy se stejně jako karbonizace řadí i pyrolýza. Bývá označována jako termický rozklad organických látek bez přístupu kyslíku. Materiál se ohřívá nad mez termické stability organických sloučenin, které jsou štěpeny na nízkomolekulární sloučeniny. Použitím katalytické pyrolýzy je možné využít komunálního odpadu, papíru, pneumatik a plastů, jako jsou například polystyren, polyetylen, PVC k výrobě biooleje. Tato technologie využití biomasy je velmi perspektivní, a to především kvůli zpracování výše uvedených odpadních materiálů [15].

Posledním typem zpracování, které se řadí mezi termické procesy, je zplyňování. Tato technologie se využívá k výrobě plynu například ze slámy, palivového či odpadního dřeva v různých podobách. Vyroběný plyn je dále využíván jako palivo pro vozidla nebo také k výrobě elektřiny a tepla [15].

Dalším typem zpracování jsou biochemické a chemické přeměny, hlavními zástupci těchto přeměn jsou alkoholové kvašení, metanové kvašení a esterifikace surových olejů.

Alkoholové kvašení – organickou fermentací v mokřím prostředí a následnou destilací rostlin obsahujících cukr a škrob se získává vysokoprocentní alkohol, například etanol, který se následně využívá jako ekologické palivo pro spalovací motory. Z kilogramu cukru lze teoreticky získat 0,65 litru čistého etanolu [15].

Metanové kvašení – neboli anaerobní fermentace je proces zpracování odpadních vod a zvířecích exkrementů bez přístupu vzduchu, při teplotě 35–45 °C. Touto přeměnou se získává bioplyn – směs plynů obsahující 50–75 % metanu, 25–40 % oxidu uhličitého a další plyny [15].

Esterifikace surových olejů – olej je získán lisováním z olejnatých rostlin a dále se pomocí substituce metylalkoholu za glycerin mění na metylester. Ten má velmi podobné vlastnosti a výhřevnost jako motorová nafta [15].

4 Měření a dosažené výsledky

Na základě literárních zdrojů je k dispozici velké množství technologií výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie. Jedna z progresivních metod, která ještě není rozšířena pro oblast ČR, je metoda zplyňování, proto se tato práce v praktické části zaměřila právě na zplyňovací technologii. Pro tuto technologii je vypracovaná SWOT analýza, viz tabulka 1:

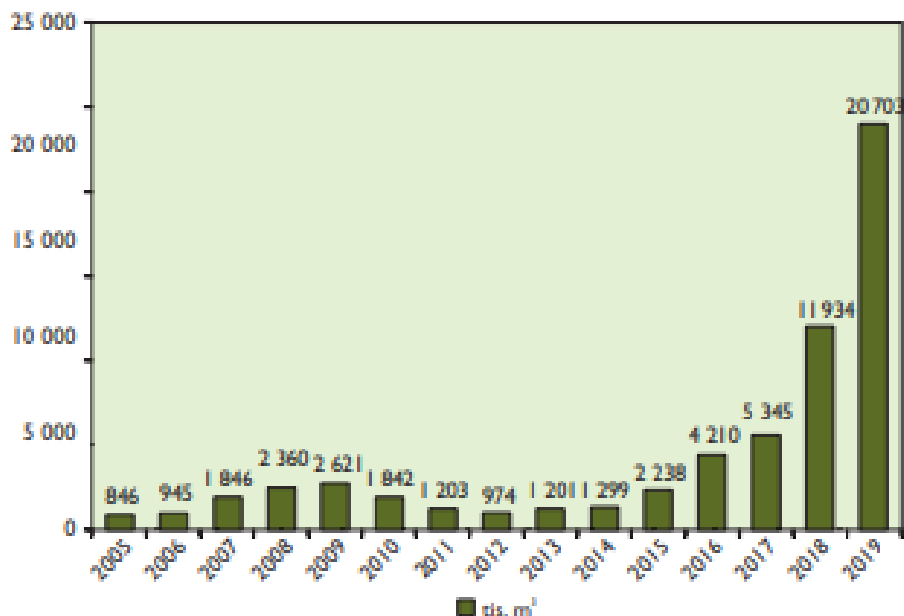
Silné stránky	Slabé stránky
Jedná se o výrobu z obnovitelných biologických zdrojů. Zvyšuje diverzifikaci využití OZE. Bezemisní technologie. Lze aplikovat na širokou škálu biomasy. Není závislá na počasí, zajišťuje dodávky suroviny v době zimní inverze.	Relativně nová metoda využití dřevní hmoty pro výrobu energie. Celková výše investiční podpory do nových OZE.
Příležitosti	Hrozby
Dekarbonizace české energetiky: ukončení využívání uhlí v Česku pro výrobu elektřiny a tepla v roce 2033–2038.	Podpora nepalivových zdrojů. Cena elektřiny z OZE.

Tabulka 1: SWOT analýza zplyňovací technologie

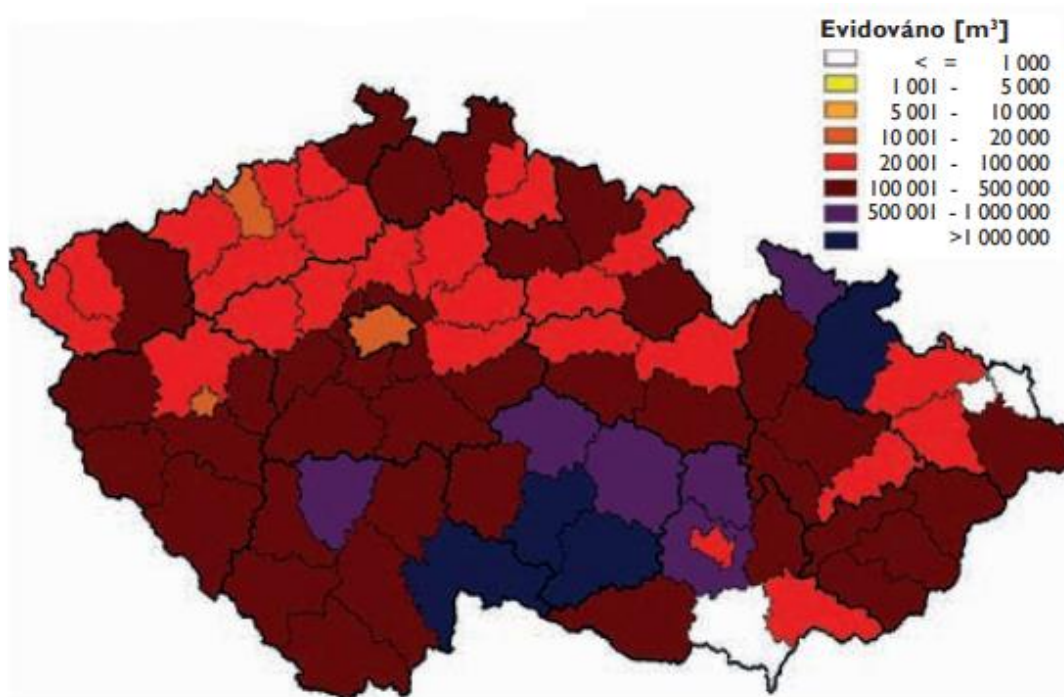
4.1 Kůrovcová kalamitní situace a její řešení

Jednou z možností je právě využití kalamitního dřeva, které nemá jiného využití. Začátky kůrovcové kalamity byly zaznamenány již v roce 1821 v Jeseníkách. Nyní se zaznamenává největší napadení lesů lýkožravým hmyzem. Pro představu, kolik toho může napáchat lýkožrout smrkový, jsou k dispozici obrázky 12 a 13. Z grafu je zřejmé, že nejvyšší objem evidovaného smrkového kůrovcového dříví je za rok 2019. Tato hodnota se vyšplhala téměř až k 21 milionům metrů

krychlových vytěženého dříví napadeného podkorním hmyzem. Nejvíce zasažené oblasti ČR se nachází v okolí Krkonoš, Šumavy, Jeseníků, Beskyd a Vysočiny [16], [17].



Obrázek 12: Evidovaný objem smrkového kůrovcového dříví vytěženého v letech 2005–2019 (tis. m³) [16]



Obrázek 13: Mapa evidovaného objemu smrkového kůrovcového dříví v České republice v roce 2019 [16]

Příčin poškození lesů zejména lýkožravým hmyzem může být hned několik. Hlavní příčinou je změna klimatu, způsobující rostoucí teplotu a snižování srážek. Z těchto důvodů dochází k dlouhodobému nedostatku půdní vláhy. Kvůli dlouhému suchému období se nevytváří pryskyřice a další ochranné prvky stromů proti škůdcům. Další příčinou je příliš velké procento zastoupení smrku v lesích na území České republiky [17], [18].

Ukázku stromu napadeného lýkožravcem lze vidět na obrázku 14, fotografie byla pořízena autorkou práce při sbírání vzorků pro měření.



Obrázek 14: Ukázka napadeného stromu lýkožravým hmyzem

Dalšímu rozšíření kůrovce by se dalo zabránit dvěma způsoby. Možností zvrácení tohoto nepříznivého stavu je likvidace lesů zničených podkorním hmyzem, zahájení výsadby nových stromů, jež by vytvořily smíšené lesy, které nejsou tolik náchylné k napadení, anebo je možné doufat v to, že se napadené lesy samy obnoví [17].

Další otázkou je, co s vytěženým dřevem, které bylo vykáceno kvůli kůrovcové kalamitní situaci. Nabízí se možnost, a tou je zpracování kalamitního dřeva pro výrobu energie. V současnosti máme několik možností, jak by se dala dřevní surovina zužitkovat k výrobě elektrické energie. Jelikož je v dnešní době hlavní

podmínkou, aby vše bylo co nejšetrnější k životnímu prostředí, a existují obnovitelné zdroje pro výrobu elektrické energie, nabízí se nám využití napadeného dřeva pro výrobu energie jako u biomasy. Dřevo se zpracuje do různých forem, což mohou být například štěpky, piliny, sekané dýhy, zbytková kulatina a odřezky. Z těchto forem lze dále vyrábět brikety a pelety.

Brikety mají většinou válcový nebo obdélníkový tvar o průměru 4 až 10 centimetrů a délce 15 až 25 cm. Brikety se vyrábějí z odpadní biomasy drcením, sušením a lisováním za tepla. Hlavní výhodou briket je jejich vysoká výhřevnost (16 až 20 MJ.kg⁻¹).

Pelety se vyrábějí pouze z dřevěného odpadu, například z pilin a hoblin, jsou to granule, které se vyrábějí protlačováním přes matrici s kruhovým průměrem. Průměr pelety je 6 až 8 milimetrů a délka 5 až 30 milimetrů. Velkou výhodou pelet je nízký obsah vlhkosti – pohybuje se kolem 10 %. Pelety mají vyšší hustotu než brikety a o trochu vyšší výhřevnost (17 až 20 MJ.kg⁻¹) [19].

4.2 Technologie pro zpracování dřevní biomasy

Technologií na zpracování dřevní biomasy je několik, těmi nejzákladnějšími a nejvíce využívanými jsou:

- pyrolýza,
- spalování,
- zplyňování.

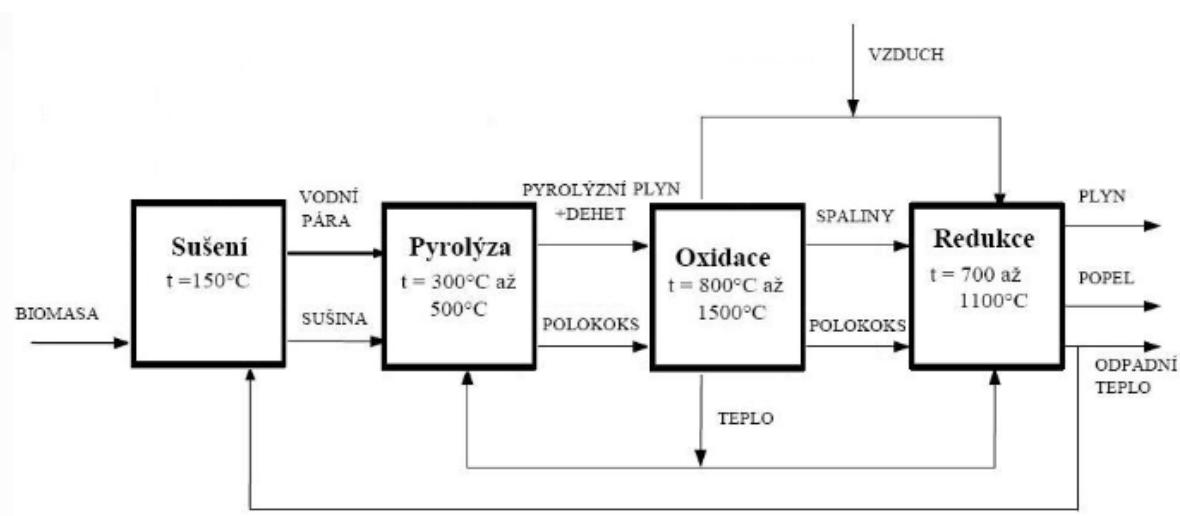
Pyrolýza je zástupcem nejstarších technologií pro výrobu energie, jež zpracovávají biomasu. Využívá se především pro zpracování odpadních materiálů, zemědělských, potravinářských, ale i lesních. Nejčastěji se však používá pro komunální odpady. Pokud se zvolí správné tepelné úpravy, lze z dřevní biomasy získat produkty s vyšší koncentrací energie. Ze dřeva se vyrábí kapalný bioolej, a to pomocí pyrolýzy. Kapalným bioolejem lze nahradit konvenční motorová paliva nebo se dá také použít jako surovina pro výrobu dalších organických chemikálií. Jelikož má dřevo rozdílné složení, je i jeho zpracování odlišné v porovnání s jinou biomasou [19].

Dalším zástupcem nejstarších technologií, který dokáže zpracovat organický nefosilní zdroj, je spalování. V tomto případě se biomasa spaluje ve speciálně upravených kotlích tepelných elektráren. Materiály, jež se zpracovávají spalováním, můžou být například odpady z lesního a zemědělského hospodářství (nejčastěji brikety, pelety, sláma, dřevní štěpka, ale i dřevěná polena). Při spalování vzniká tepelná energie a ta se poté využívá pro výrobu elektrické energie buď v parním cyklu, nebo je dodávána odběratelům ve formě tepla [20].

Nejvýhodnějším způsobem zpracování dřevního materiálu pro výrobu energie je technologie zplyňování. Vyřeší se tak problém s přebytkem dřeva, které bylo pokáceno kvůli kalamitní situaci. Tímto způsobem je možné vytvořit významně více energie než konvenčním spalováním.

4.3 Zplyňování

Zplyňování je termochemický proces, při němž dochází k přeměně pevného či kapalného skupenství na energeticky výhodný plyn. Jelikož je zplyňování velmi složitá metoda, dochází při ní hned k několika procesům. Těmi jsou sušení, pyrolýza, oxidace a redukce. Zobrazeny jsou na obrázku 15. Tyto procesy jsou ovlivněny především „provozní teplotou a teplotním profilem v reaktoru, provozním tlakem v reaktoru, obsahem vlhkosti v palivu a zplyňovacím médiem, reakčním povrchem a dobou setrvání složek v reaktoru“ [22].



Obrázek 15: Základní schéma zplyňování [21]

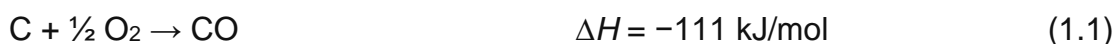
Sušení probíhá při teplotě do 200 °C, kdy dochází k ohřevu paliva s odpařením vázané vody. Fáze sušení potřebuje velké množství tepla především k tomu, aby se snížila vlhkost paliva nejlépe na 15 %. Čím vyšší je vlhkost, tím menší je celková účinnost.

Pyrolýza je velmi důležitým procesem, kdy dochází k tepelnému rozkladu paliva se zamezeným přístupem oxidačního media. Tím může být například kyslík nebo vzduch. V rozmezí teplot 300–500 °C probíhá suchá destilace, při níž dochází ke štěpení řetězců vysokomolekulárních organických látek a k přeměně na plynné a kapalně organické produkty a polokoks. Při vyšších teplotách (500–700 °C) jsou produkty suché destilace dále štěpeny a transformovány z kapalných organických látek i z pevného uhlíku na plynné látky.

V pyrolytické zóně vznikají látky pevného, kapalného a plynného skupenství. Tuhý pyrolýzní zbytek se skládá z 80–85 % tuhého uhlíku, 15–20 % prchavých látek a 0–2 % popela. Při rychlé pyrolýze vznikají plynné produkty představující 5 % obsahu energie biomasy a při pomalé pyrolýze 25–30 %. Kapalně produkty vznikají při pomalé pyrolýze, nejznámějším kapalným produktem je pyrolýzní olej. Při teplotách nad 500 °C je vyprodukováno 75–90 % prchavé hořlaviny. Mezi hlavní složky (až 95 %) patří oxid uhelnatý (CO), oxid uhličitý (CO₂), metan (CH₄), vodík (H₂), vodní pára (H₂O). Výhřevnost vyrobeného plynu je okolo 3,5 až 8,9 MJ/m³.

V oblasti, kde se přivádí vzduch nebo kyslík jako zplyňovací médium, je zóna oxidace. Dochází zde k endotermické reakci, která vyžaduje velké množství tepla. Potřebné teplo vnikne pomocí spalovací exotermické reakce. Použitím kyslíku nebo vzduchu, jenž je zde jako zplyňovací médium, se u vstupu začne tvořit oxidační vrstva, dosahující teploty kolem 800–1500 °C. Oxidace uhlíku a plynných produktů pyrolýzy probíhá podle níže uvedených rovnic:

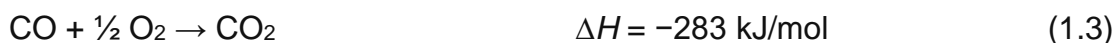
Částečná oxidace pevného uhlíku:



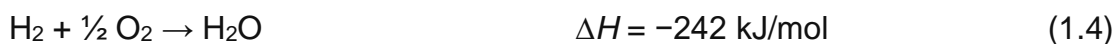
Úplná oxidace pevného uhlíku:



Oxidace oxidu uhelnatého CO:



Oxidace vodíku H₂:

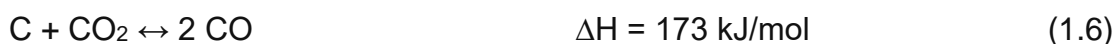


Oxidace metanu CH₄:



V utvořeném plynu vznikají vlivem redukce spalitelné látky. Pomocí reakce se oxid uhličitý (CO₂) mění na oxid uhelnatý (CO) a vodní páry (H₂O) na vodík (H₂). Zároveň může uhlík vstupovat do chemické reakce s vodíkem, ze které vznikne metan (CH₄). Boudouardova reakce, heterogenní reakce vzniku vodního plynu a heterogenní vznik metanu napomáhají vyrobit výsledný bioplyn. Všechny tyto zmíněné reakce probíhají bez přítomnosti kyslíku, což má za důsledek snížení teploty plynu, a převážná část uhlíku je spálena nebo zredukována na oxid uhelnatý (CO).

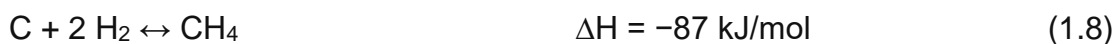
Boudouardova reakce:



Heterogenní reakce vzniku vodního plynu:

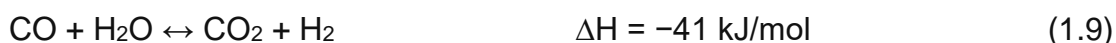


Heterogenní vznik metanu:



Současně s těmito reakcemi probíhají i další reakce:

Homogenní reakce vodního plynu:



Homogenní vznik metanu:



Homogenní redukce oxidu uhličitého:



Výsledný plyn se skládá z oxidu uhelnatého, vodíku a metanu, dále obsahuje vodní páru, oxid uhličitý a dusík [22].

4.3.1 Druhy zplyňovacích reaktorů

Vývoj zplyňovacích reaktorů probíhá již mnoho let. Bylo navrženo, zkonstruováno a testováno několik reaktorů. Zdokonalení reaktorů vedlo především ke zvýšení jejich výkonu, provozního tlaku a zlepšení možností využití.

Reaktory se dělí podle různých aspektů, například:

Podle konstrukce reaktoru:

- s pevným ložem – souprroudé, protiproudé, s křížovým tokem,
- s fluidním ložem,
- s unášivým proudem.

Podle zplyňovacího media:

- parní,
- parokyslíková směs,
- kyslíkové,
- vzduchové.

Podle zdroje tepla pro zplyňování:

- autotermní,
- kyslíkové,
- alotermní.

Rozdíl mezi autotermním a alotermním zplyňováním je v teple, které je dodáváno buď přímou, nebo nepřímou cestou. U autotermního je použito přímé spalování

biomasy. Naopak u aloterního zplyňování je teplo přiváděno pomocí nepřímého ohřevu.

Podle tlaku v reaktoru:

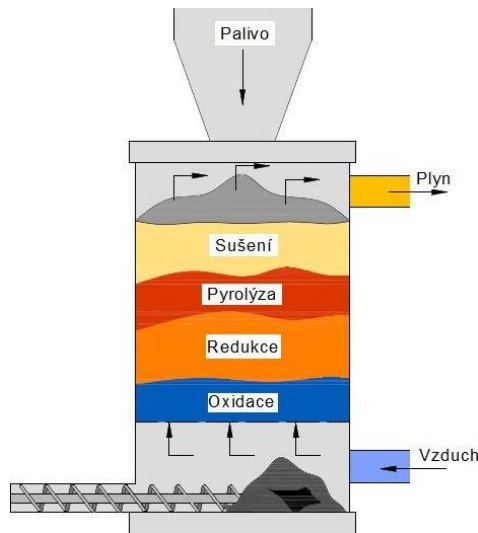
- atmosférické,
- tlakové [22].

4.3.1.1 Zplyňovací reaktor s pevným ložem

Tento typ reaktoru je nejvíce používaným pro zpracování biomasy. Zplyňovací reaktory s pevným ložem fungují na principu vícestupňového nebo nepřímého zplyňování. Jednotlivé procesy by měly být odděleny, aby dehty neobsahovaly části pevných paliv a byly spáleny v plynném stavu. Tímto procesem by se zlepšily podmínky pro jejich smíchání se vzduchem. Přiváděné teplo, které je potřeba pro technologii zplyňování, je vedeno dvěma způsoby, a to přímo s palivem, nebo nepřímo přes výměník tepla. Zplyňovací reaktory lze dělit podle směru toku pevných částic a proudu plynu na souproude, protiproude a s křížovým prouděním [22].

4.3.1.2 Protiproudý reaktor „UPDRAFT“

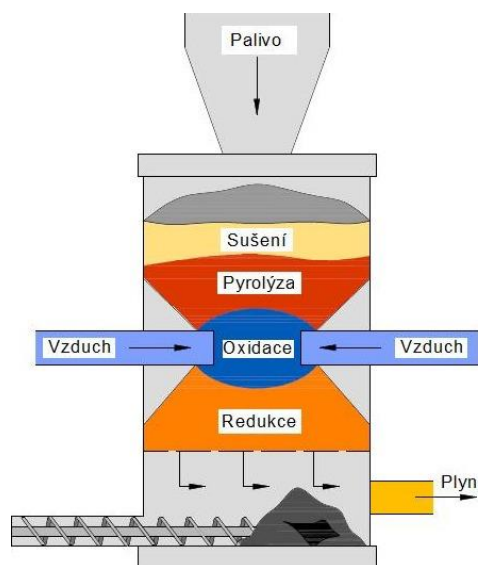
Protiproudý reaktor se používá pro všechny druhy paliva (i s vyšším obsahem vlhkosti), proto je také nejpoužívanějším a nejjednodušším typem. Palivo je přiváděno z vrchu reaktoru, poté se pohybuje směrem dolů, protože dochází ke zplyňování a odvodu popela. Zplyňovací médium (vzduch nebo pára) je přiváděno v oxidačním pásmu, jež je ve spodním úseku reaktoru. Vyrobený plyn proudí směrem vzhůru a prochází přes všechny procesní zóny. V nich předává své vnitřní teplo a díky tomu dochází k ochlazení pod 250 °C a pohlcení pyrolýzních produktů. Velkou výhodou je dosažení maximální účinnosti a co největšího využití tepla. Nevýhodou je vyšší obsah dehtových látek a pyrolýzních produktů v plynu (Obrázek 16).



Obrázek 16: Schéma protiproudého reaktoru [22]

4.3.1.3 Souproudý reaktor „DOWNDRAFT“

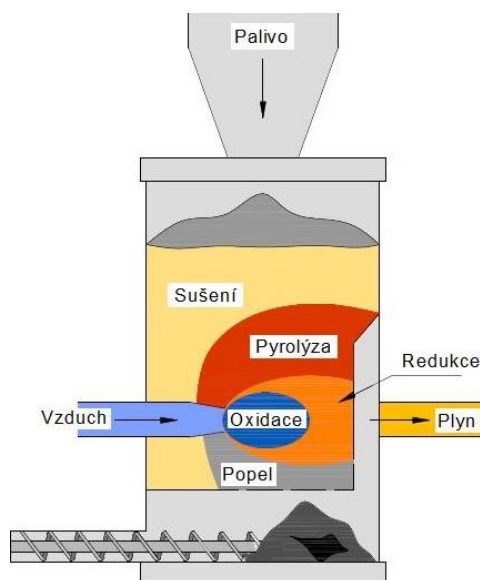
Jak lze vidět na obrázku 17, palivo u souproudého reaktoru je přiváděno shora. Souproudý reaktor má stejné procesní zóny jako reaktor protiproudý, jen v jiném pořadí. V oblasti pyrolýzy a oxidace dochází ke vzniku pyrolýzních produktů. V redukční zóně dochází k dělení vzniklých produktů na rozžhaveném uhlí. V oxidačním pásmu je přiváděno zplyňovací medium, v tomto případě vzduch. Nevýhodou této technologie je vyšší obsah prachových částic v plynu a vyšší teploty výstupního plynu, protože je poslední fází redukce. Vzniklý plyn je odváděn z boku reaktoru [22].



Obrázek 17: Schéma souproudého reaktoru [22]

4.3.1.4 Reaktor s křížovým tokem

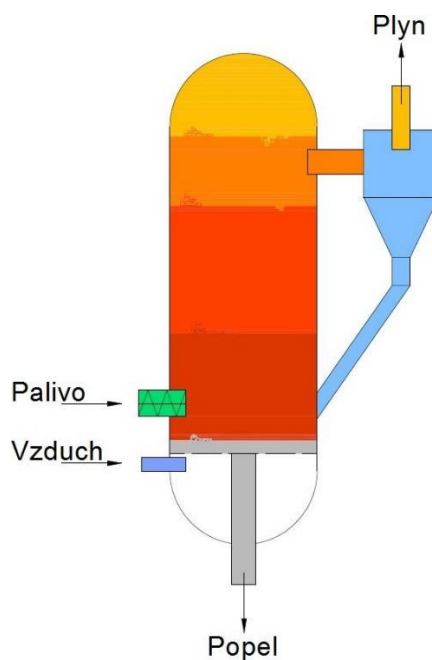
Tento reaktor byl navržen hlavně pro zplyňování kvalitního dřevěného uhlí. Teploty samotného zplyňování dosahují až 1 500 °C, jsou velmi vysoké a mohou poškodit konstrukční materiál reaktoru. Výhodou je jednoduché čištění. Stačí vyčistit jen cyklon a filtr (Obrázek 18), [22].



Obrázek 18: Schéma reaktoru s křížovým tokem [22]

4.3.1.5 Zplyňovací reaktor s fluidním ložem

U reaktoru s fluidním ložem probíhají stejné procesy jako u reaktoru s pevným ložem, ale u fluidního lože probíhají procesy najednou v celém reaktoru. Palivo se v tomto procesu zplyňuje ve vznosu. Před začátkem zplyňování leží palivo s inertním materiálem na porézním dně. Zplyňovací medium (například vzduch) je přiváděno v dolní části pro zajištění překonání prahové rychlosti fluidace neboli překonání tíhové síly působící na materiál. V tento okamžik se palivo a inertní materiál začne vířit a chovat se jako tekutina. Když se zvýší rychlost, vrstva paliva se začne rozpínat a snižovat svou hustotu. Po dosažení rychlosti úletu začnou jednotlivé částičky ulétat. Pro nahřátí inertního materiálu se používá uhlí, po nahřátí a spálení uhlí se začne přivádět biomasa pro zplyňování. Při zplyňování ve fluidní vrstvě dojde ke spálení kolem 25 % biomasy a zbytek se zplyní při teplotě 700–900 °C (Obrázek 19), [22].



Obrázek 19: Schéma zplyňovacího reaktoru s fluidním ložem [22]

4.3.1.6 Reaktor se stacionární fluidní vrstvou

Reaktor se stacionární fluidní vrstvou má velice dobré vlastnosti, proto je také často využíván. Hlavní výhodou je, že fluidní vrstva má viditelnou hladinu. Obsah dehtu plynu je zde maximálně do 2 % [22].

4.3.1.7 Reaktor s cirkulující fluidní vrstvou

Reaktor s cirkulující fluidní vrstvou je opakem reaktoru se stacionární fluidní vrstvou – hladina vrstvy není tak zřetelná, ale je ohraničena stropem reaktoru. U dna reaktoru je hustota vrstvy nejvyšší a u stropu nejnižší. Dále tento reaktor dokáže více využít palivo, jelikož v cyklonu jsou zachycovány unášené částice, které jsou následně vráceny zpět do spodní části fluidní vrstvy [22].

4.3.1.8 Reaktor s unášivým proudem

Principem této technologie je nafoukání rozemletého suchého nebo mokrého paliva zplyňovacím médiem do reaktoru, a to velkou rychlostí, ovšem jemně. Zplyňovací teploty se zde pohybují kolem 1 200–2 000 °C, kdy dochází k přeměně popela

na strusku. Ta poté odtéká z reaktoru. Velkou výhodou této výroby plynu je velmi nízký obsah dehtů [22].

4.3.2 Dodavatelé zplyňovacích zařízení dřevní hmoty

Ve světě jsou zplyňovací technologie stále více žádané. Především je to kvůli rozšíření obnovitelných zdrojů a ekologii. Další výhodou jsou zde kotlíkové dotace, které jsou v České republice zrovna aktuálním tématem. Výrobce zplyňovacích zařízení najdeme po celém světě. Velké zastoupení výroby zařízení pro zplyňování je už i v Evropě. Známymi evropskými firmami jsou například:

Firma Fröling byla založena v Rakousku v roce 1961, už od počátku založení patřila do skupiny moderní topné techniky s technologií vytápění dřevem. Po roce 2000 se podnik Fröling rozšířil o několik dalších poboček nejen v Rakousku, ale i v Německu, Itálii a Francii. V dnešní době najdeme pobočku i v České republice. Fröling vyrábí několik typů kotlů, jež zpracovávají biomasu ve formě pelet, dřevní štěpky a palivového dříví [23].

V roce 1998 zakladatel podniku Volter Ltd Juha Sipilä vynalezl soběstačný zdroj elektrické energie, který se skládal z větrného mlýna a naftové centrály, po několika letech naftu vyměnil za dřevní štěpky. K tomuto nápadu ho přivedly vysoké náklady na elektřinu. Aby Volter dokázal, že zplyňovací technologie na dřevní biomasu funguje, postavil v roce 2006 zplyňovač na zadní straně pickupu. Rok 2010 byl velice důležitý, protože bylo postaveno první zplyňovací zařízení. Od roku 2011 byl zahájen prodej. Dnes firma Volter vyrábí zařízení na zplyňování dřevní biomasy i o velikosti kontejneru. Tato firma je známá po celém světě a stala se výhercem ocenění Kasvu Open, což je národní soutěž pro růstové společnosti ve Finsku [24].

Další známou firmou je Burkhardt GmbH. Byla založena již v roce 1879 jako kovárna. Po několika letech došlo k rozšíření oborů v oblasti sanitárních, topných, ventilačních a instalatérských systémů. Ve 21. století začíná pronikat do sektoru energetiky a pouští se do výroby zplyňovačů dřevní hmoty [25].

4.4 Popis měřených vzorků

Na jaře v roce 2020 bylo sesbíráno 24 kusů výřezů smrků, které byly napadeny kůrovcem. Napadené dřevo se nacházelo na Českolipsku v oblasti Libereckého kraje (Obrázek 20). Sesbírané výřezy smrku měly maximální délku 50 cm a středovou tloušťku do 20 cm, 20–40 cm a nad 40 cm. U každého výřezu je odhadnuta doba napadení kůrovcem. Vzorky byly uloženy v areálu ČZU. Polovina smrkových výřezů byla umístěna venku a druhá polovina v hale.



Obrázek 20: Sbíráání vzorků na Českolipsku

U těchto vzorků potřebujeme stanovit kvalitativní parametry, kterými jsou:

- obsah vody v původním palivu W (% hm.),
- prvkové složení C, H, N (% hm.),
- obsah síry S (% hm.),
- spalné teplo Q_s ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) a výhřevnost Q_j ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Složení tuhého paliva se rozděluje do tří částí: voda, popel a hořlavina.

Voda je nehořlavou částí tuhého paliva a je nežádoucí, protože snižuje tepelnou hodnotu.

Další nehořlavou částí je popel. Stejně jako voda snižuje výhřevnost a značně ovlivňuje termochemický pochod.

Poslední částí tuhého paliva je hořlavina, ta se skládá z prvků, kterými jsou uhlík, vodík, síra a dusík. Díky těmto prvkům dochází k exotermickým a endotermickým reakcím, kde okysličovadlem je kyslík [26].

Spalné teplo je množství tepla uvolněného dokonalým spálením měrné jednotky paliva při ochlazení vzniklých spalin na teplotu 0 °C za předpokladu, že pára, která vzniká při spalování, zcela zkondenzuje. V provozních podmínkách však spaliny odcházejí při vyšší teplotě než 100 °C a voda se mění v páru. Z tohoto důvodu se při tepelných výpočtech častěji používá výhřevnost paliva.

Výhřevnost paliva je množství tepla, které je uvolněno při dokonalém spálení paliva a ochlazení spalin na 0 °C, kdy vlhkost paliva zůstane ve spalinách v podobě vodní páry. Hodnota výhřevnosti je nižší než hodnota spalného tepla o množství tepla, které bylo potřebné k ohřevu vody z původní teploty na 100 °C, a také o skupenské teplo vypařování vody [27].

4.5 Popis měření a měřicích zařízení

Měření bylo provedeno v laboratoři analýzy organických materiálů na Technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze, která je vybavena základní analytickou technikou. V laboratořích byla provedena analýza kvalitativních parametrů na 24 výřezech ze smrků. Z těchto naměřených parametrů se určují palivářské vlastnosti a dále vhodné provozní podmínky při zplyňování.

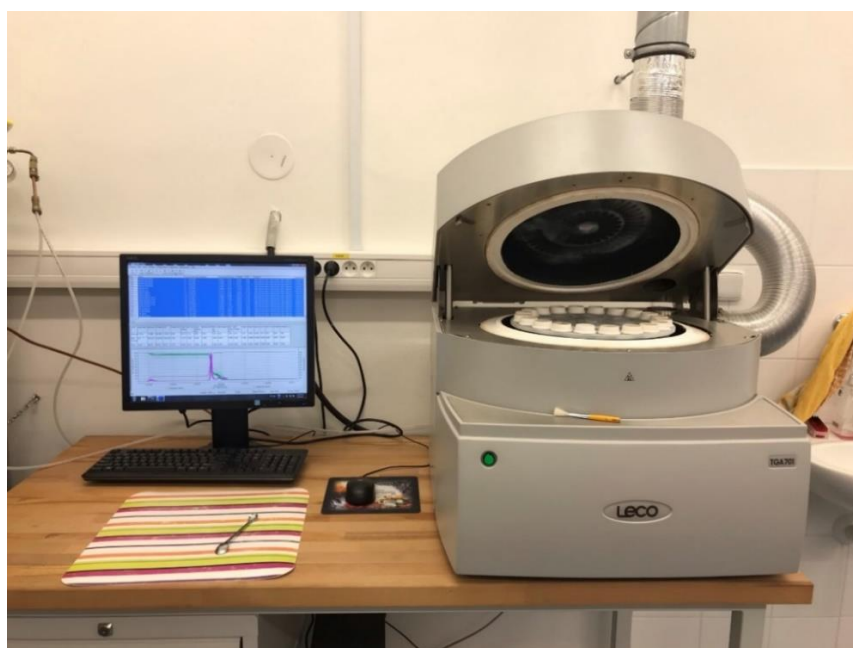
Než začalo samotné měření, museli jsme provést předúpravu vzorků. Spočívá v tom, že se nejdříve musí odebrat vzorky z výřezů smrků, a to přírůstkovým vrtákem. Dále je odebraný materiál sušen – při teplotě 105 °C – v horkovzdušné sušárně Memmert UF30. Sušení bylo prováděno do té doby, až hmotnost vzorků zůstala neměnná. Posledním krokem předúpravy je drcení. K rozdrocení materiálu na požadovanou velikost 1 mm byl použit střížný mlýn Retsch SM 100.

K vážení všech vzorků byla použita laboratorní váha Sartorius SP124 S, jež dokáže vážit s přesností na 0,1 mg (Obrázek 21).



Obrázek 21: Laboratorní váha Sartorius SP124 S

Druhým krokem bylo už samotné měření na termogravimetrickém analyzátoru LECO TGA-701, který je připojen na počítač. Termogravimetrický analyzátor má několik částí: pece, integrovaný karusel a interní váhy. Karusel obsahuje několik kelímků s uzavíratelnými víčky. Do nich se vloží 1 gram vzorku. Tento přístroj nám změřil obsah vlhkosti, prchavé hořlaviny a obsah popela ve vzorcích, které byly zapsány do programu. K tomuto měření byly použity technické plyny jako vzduch, dusík a kyslík (Obrázek 22, 23).

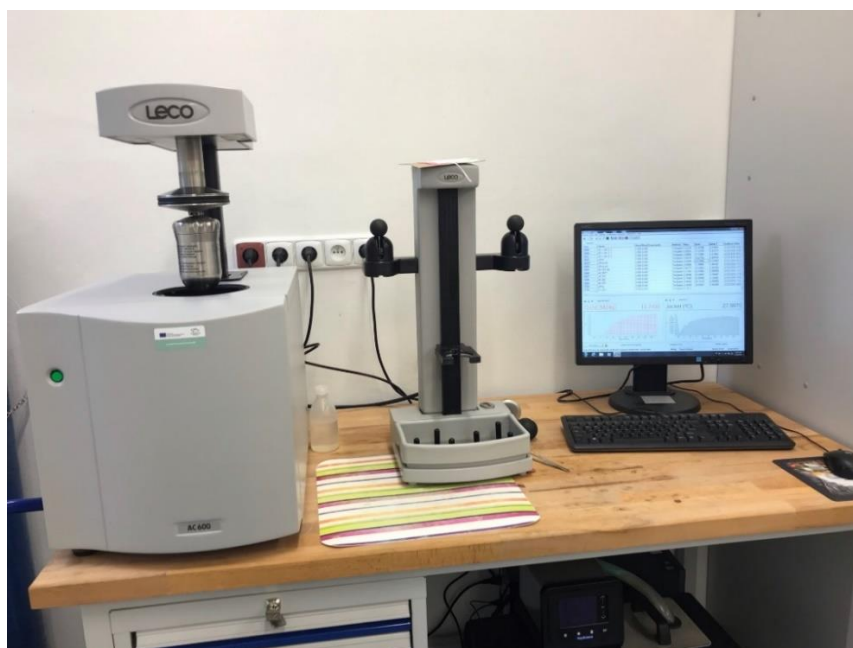


Obrázek 22: Termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701



Obrázek 23: Detailnější foto kelímků

Třetím krokem bylo měření na poloautomatickém kalorimetru LECO AC-600, kde byla potřeba i tlakové láhve se stlačeným vzduchem a kyslíkem. Pomocí kalorimetru se stanovuje spalné teplo a výhřevnost. Vše je zase řízeno pomocí počítače a programu propojeného s přístrojem. Nejprve se vzorky musely slisovat do tvaru tablety o hmotnosti 1 g, poté se vložily do kovového kelímku, ten byl vložen do držáku víka spalovací bomby, kde probíhá spálení vzorku. Spálení vzorku způsobí zapalovací drátek, jehož se dotkne zapalovací nit. Můžeme tedy říct, že teplo, které bylo uvolněno, je spalné teplo analyzovaného vzorku. Celý proces trval přibližně 5 až 9 minut (Obrázek 24).



Obrázek 24: Kalorimetr LECO AC-600

Čtvrtým krokem našeho měření bylo stanovení dusíku, uhlíku a vodíku v organických materiálech. Tyto hodnoty se měří na elementárním analyzátoru LECO CHN628. Princip toho přístroje spočívá ve spalovací analýze, která trvá asi 4,5 minuty. Stejně jako předchozí přístroje je i tento připojen k počítači, jímž se ovládá. Potřebnými plyny ke spalovací analýze jsou helium (nosný plyn), kyslík (spalovací plyn) a stlačený vzduch (pneumatický plyn). Vzorek je vložen do fóliového kelímku, ten se vloží do automatického podavače, který jej umístí do primární pece, a tam nastane úplné spálení. Ve vzorku jsou přítomné prvky: dusík, vodík a uhlík, ty jsou oxidovány na oxid uhličitý, vodu a oxidy dusíku. Tyto vytvořené sloučeniny jsou pomocí nosného kyslíku přemístěny do sekundární pece. V primární i sekundární peci dochází také k oxidaci (Obrázek 25).

Pátým a posledním krokem je stanovení síry, což se provádí na analyzátoru LECO CHN628+S. Data jsou opět zapisována pomocí počítače, který je připojen na měřicí přístroj. Zkoumaný vzorek je vložen do spalovací lodičky a ta následně putuje do pece, v níž při teplotě 1 350 °C dochází k oxidaci, kdy vzniká oxid siřičitý. Celý tento proces trvá 1 až 2 minuty (Obrázek 25, 26).



Obrázek 25: Analyzátor LECO CHN628+S (vlevo), Analyzátor LECO CHN628 (vpravo)

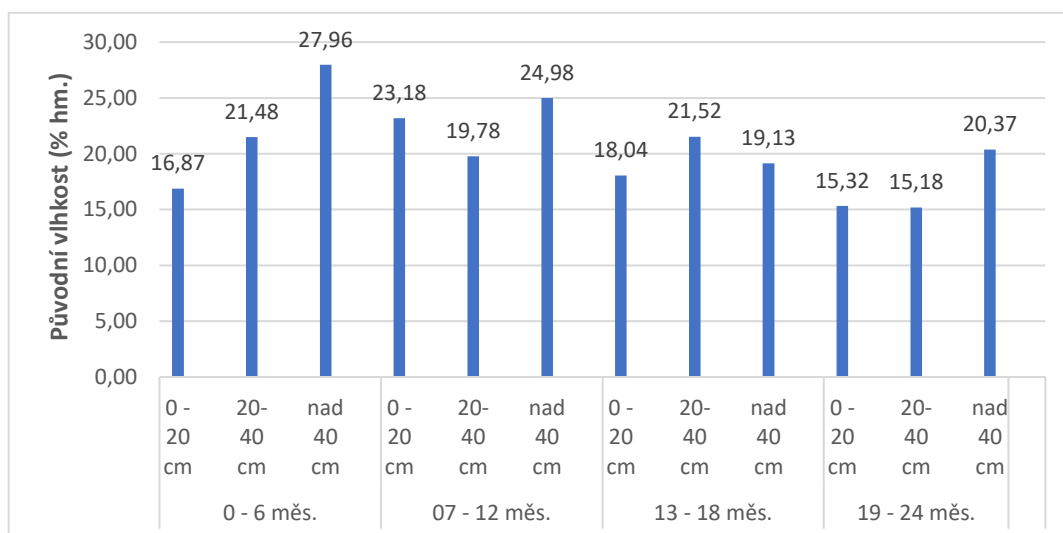


Obrázek 26: Spalovací lodičky

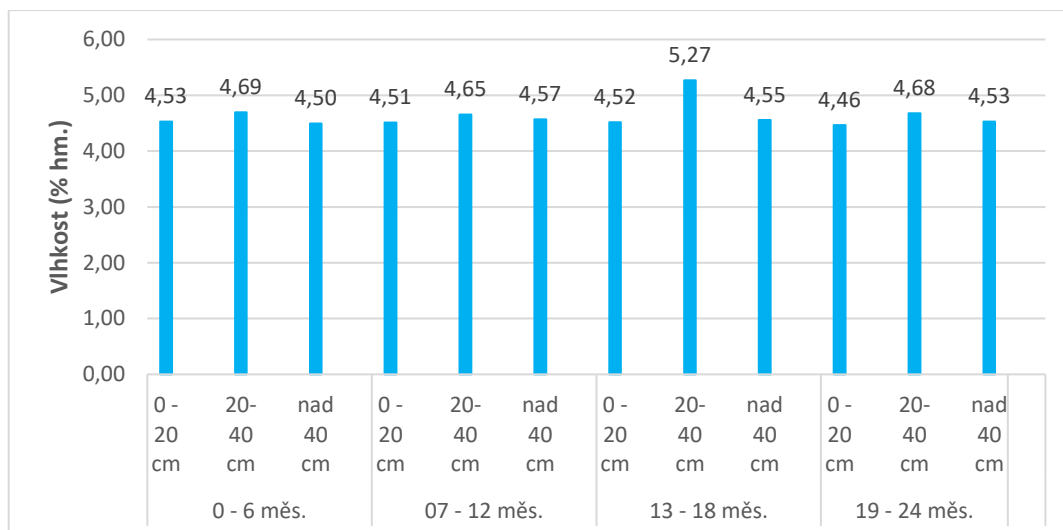
Každý vzorek byl měřen celkem třikrát, z naměřených hodnot každého vzorku byly vypočteny průměry a ty byly následně zapsány do tabulek. Tabulky jsou k nahlédnutí v příloze č. 1, 2 a 3.

4.6 Výsledky a jejich hodnocení

4.6.1 Obsah vody



Obrázek 27: Výsledné průměrné hodnoty původních vlhkostí vzorků ze smrku



Obrázek 28: Výsledné průměrné hodnoty snížených vlhkostí vzorků ze smrku

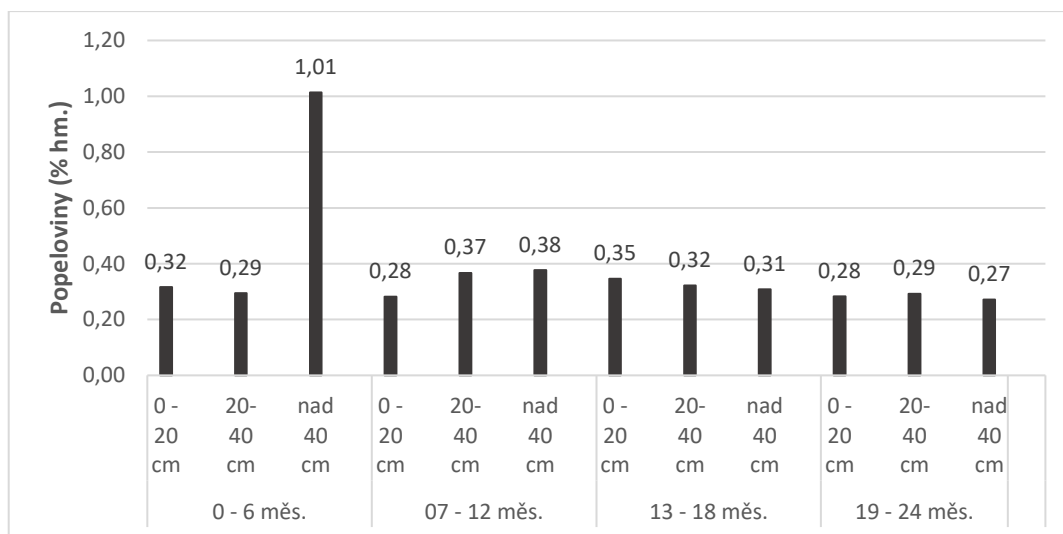
Na obrázku 27 je graf, který znázorňuje průměrné původní vlhkosti u výřezů, které byly nasbírány v oblasti Českolipska. Nejvyšší obsah vody u nasbíraných vzorků ze smrku byl naměřen u výřezů se stářím do 12 měsíců. Naměřené hodnoty se pohybují od 16,87 % hm. do 27,96 % hm. Od 13. měsíce stáří vzorků jsou hodnoty obsahu vody nižší, s průměrnou hodnotou 19,76 % hm., je tedy zřejmé, že dochází k vysychání.

Obsah vody v dřevní biomase je jedním z nejdůležitějších parametrů pro výrobu energie. Postupem času by mělo docházet k samovolnému snižování vlhkosti, ale velice záleží na tom, kde je dřevní biomasa uskladněna. Je tedy nutné snížit původní vlhkost, která je obsažená v kalamitním dříví, na co nejnižší hodnotu. Na obrázku 28 je vidět, jak se snížila vlhkost u výřezů ze smrku, které byly vysušeny v horkovzdušné sušárně Memmert UF30 při teplotě 105 °C. Celková průměrná hodnota původní vlhkosti u 24 nasbíraných vzorků se snížila z 20,32 % hm. na 4,62 % hm.

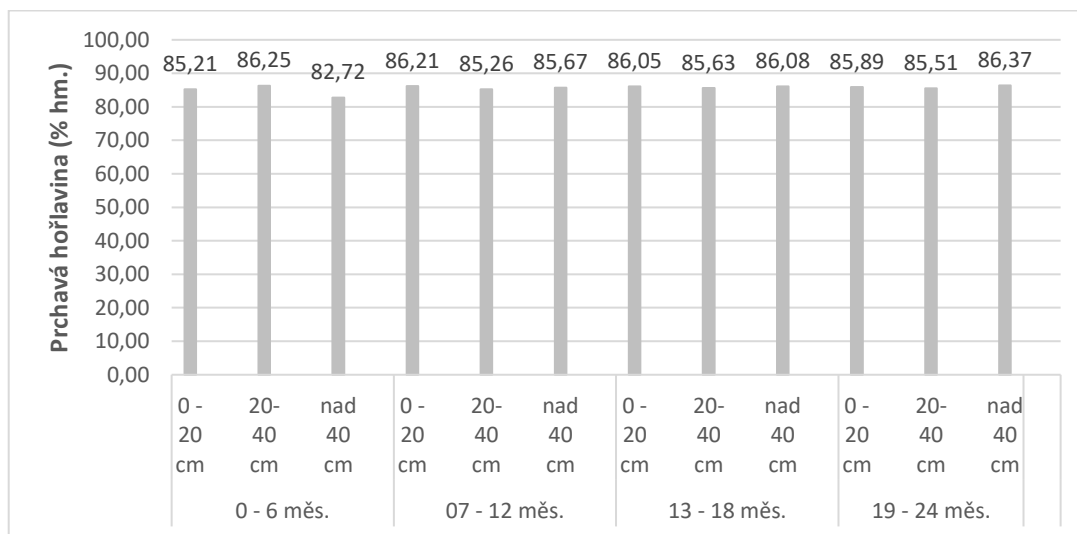
4.6.2 Popel a prchavá hořlavina

Dalšími důležitými parametry dřevní biomasy pro energetické využití jsou popeloviny a prchavá hořlavina. Popeloviny jsou minerální látky, obsažené v tuhém palivu ještě před samotným spálením. Po dokonalém spálení biomasy zůstane tuhý zbytek, který se nazývá popel. Prchavá hořlavina je důležitá pro spalovací proces,

kteřý stabilizuje a zároveň podporuje vzněcování paliva. Čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny, tím dojde k lepšímu zapálení paliva. Dřevo jako rostlinná biomasa má vysoký obsah hořlaviny, proto také hoří dlouhým plamenem.



Obrázek 29: Výsledné průměrné hodnoty popela v % hm. vzorků ze smrku



Obrázek 30: Výsledné průměrné hodnoty prchavé hořlaviny v % hm. vzorků ze smrku

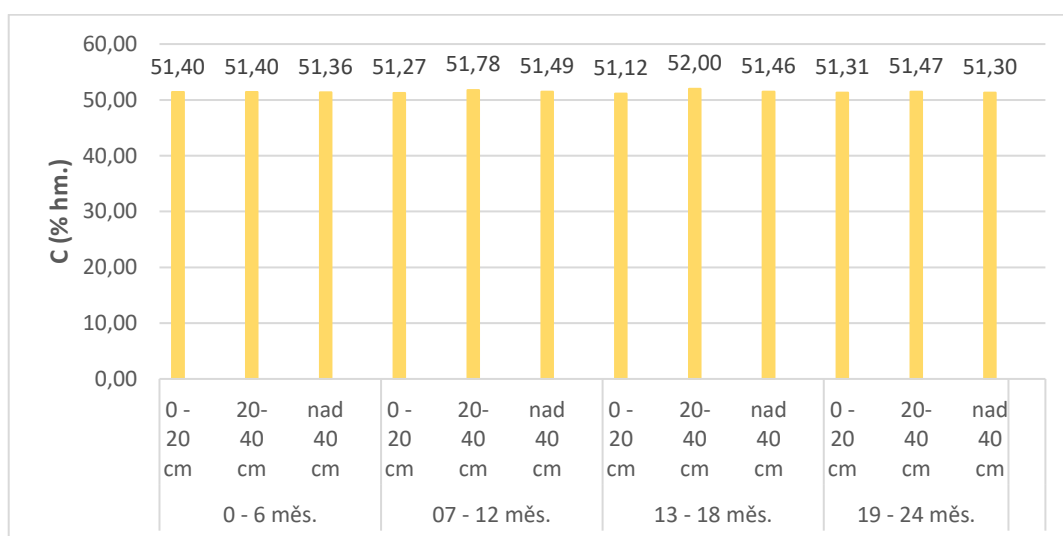
Obrázek 29 znázorňuje výsledné průměrné hodnoty popela v % hm. v sušině vzorků ze smrku. V našem měření mají všechny výřezy smrků průměrnou hodnotu množství popela 0,37 % hm. Tato průměrná hodnota je vcelku nízká. Nejvyšší naměřená průměrná hodnota je 1,01 % hm., řadí se ke vzorkům se stářím do 6 měsíců s průměrem nad 40 cm.

Vzorky mají téměř zanedbatelný rozdíl prchavé hořlaviny, až na jednu hodnotu, která je zde nejnižší – 82,72 % hm. Tato hodnota spadá do kategorie vzorků

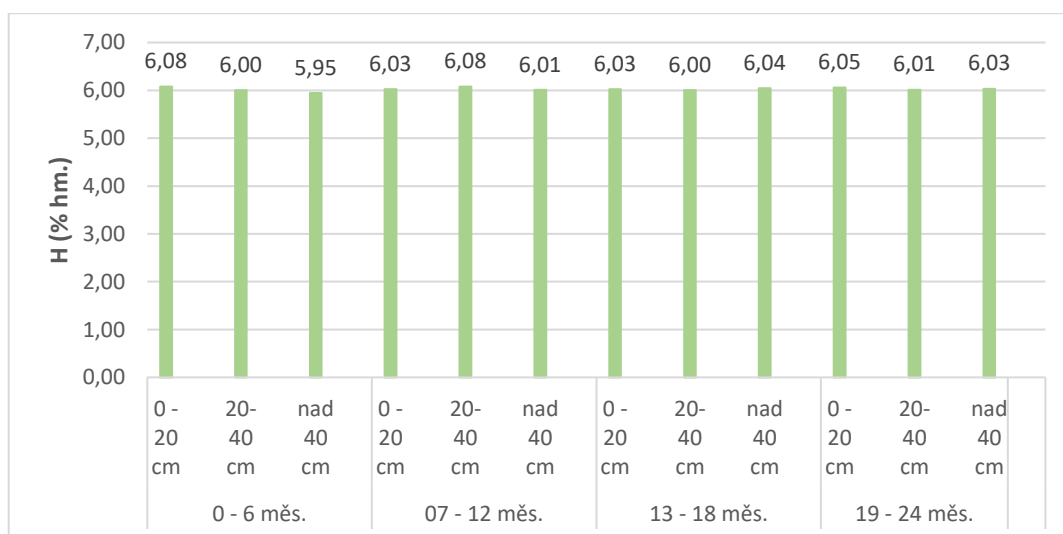
se stáří do 6 měsíců s průměrem nad 40 cm. Celková průměrná hodnota všech výřezů smrku vychází 85,57 % hm. Průměrné výsledky pro všechny výřezy můžeme vidět na obrázku 30.

4.6.3 Výsledné hodnoty stanovení kvalitativních parametrů

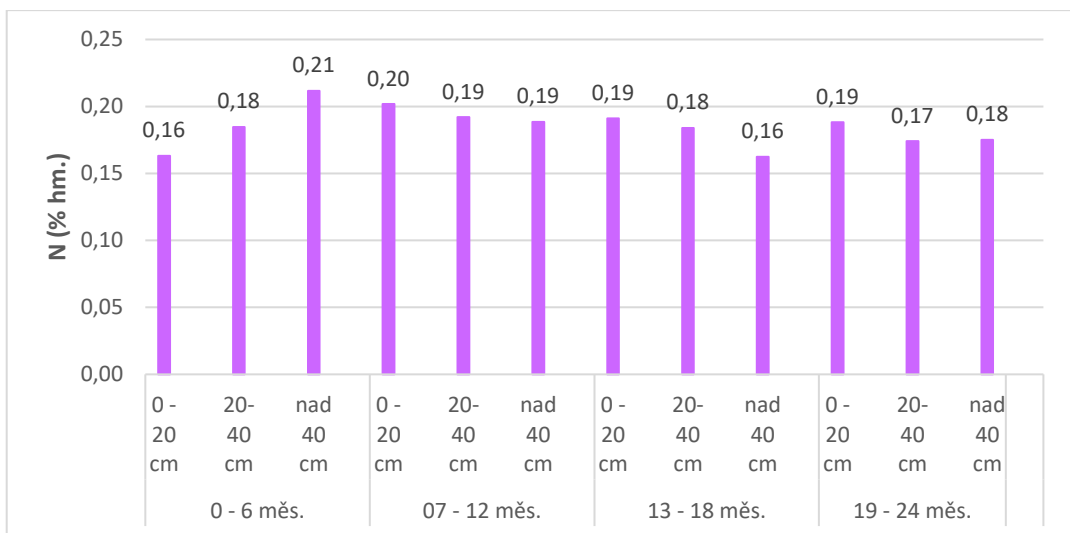
Prvková analýza je velmi důležitá pro zhodnocení kvality vzorků pro energetické využití. Hlavními prvky elementární analýzy jsou uhlík, vodík, dusík, kyslík a síra. Jednotka % hm. udává procentuální hmotnostní podíl těchto prvků v původním palivu.



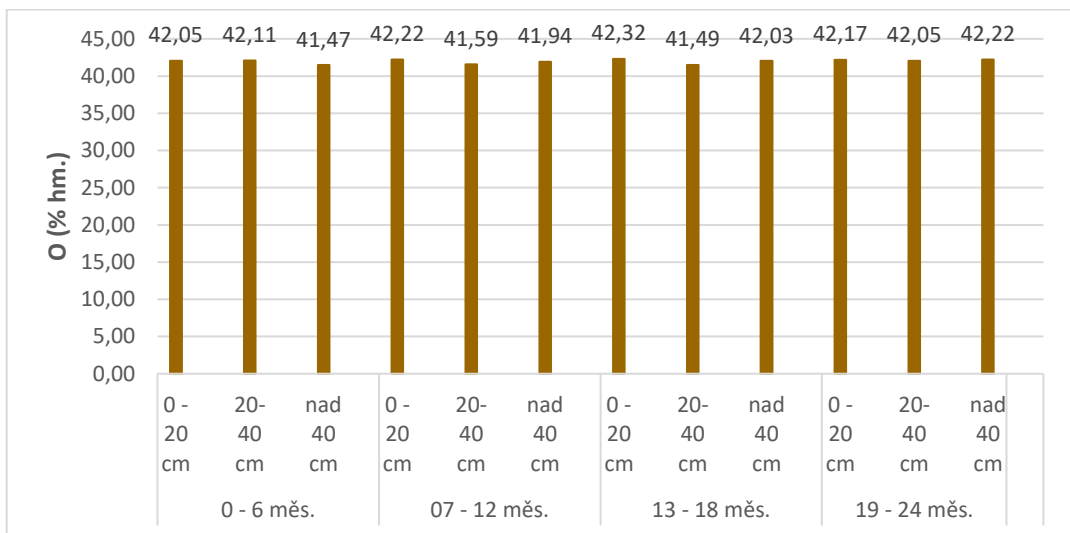
Obrázek 31: Výsledné průměrné hodnoty uhlíku v % hm. vzorků ze smrku



Obrázek 32: Výsledné průměrné hodnoty vodíku v % hm. vzorků ze smrku



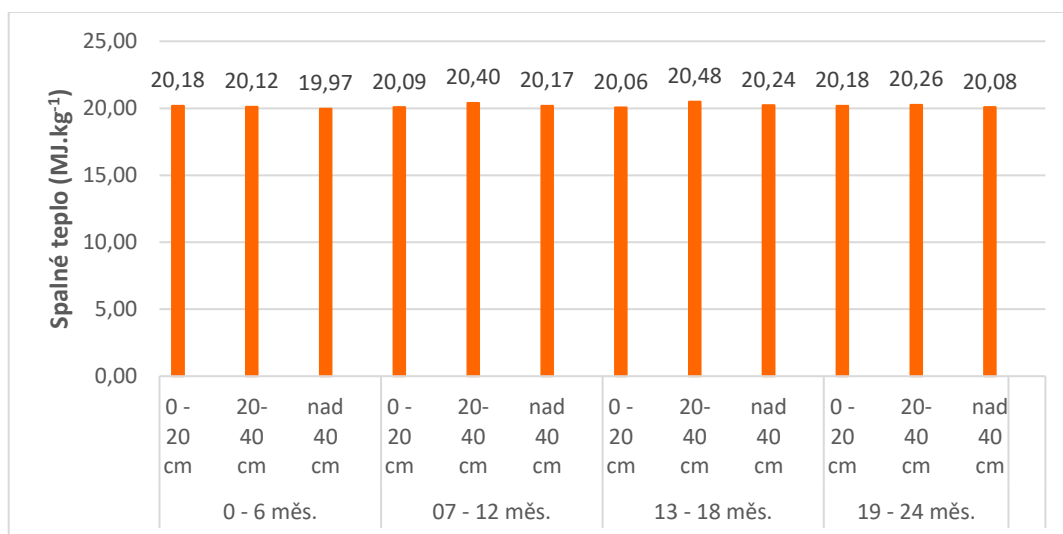
Obrázek 33: Výsledné průměrné hodnoty dusíku v % hm. vzorků ze smrku



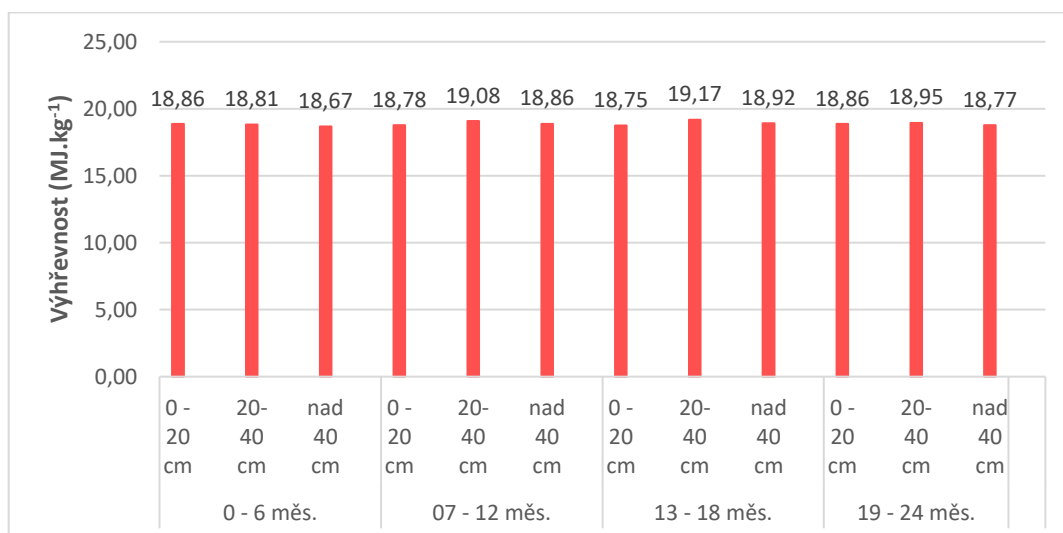
Obrázek 34: Výsledné průměrné hodnoty kyslíku v % hm. vzorků ze smrku

Na obrázcích 31, 32, 33 a 34 jsou vyobrazeny grafy s výslednými průměrnými hodnotami prvkové analýzy vzorků ze smrku. Nejvyšší zastoupení ve vzorcích má uhlík s průměrnou hodnotou 51,45 % hm. a dále také kyslík, který má průměrný obsah v sušině 41,97 % hm. Hodnoty vodíku a dusíku jsou téměř konstantní, na rozdíl od hodnot dusíku. Graf výsledných průměrných hodnot síry z výřezů smrku nebyl potřeba, protože všechny naměřené hodnoty vyšly nulové (viz Příloha č. 3), tudíž síra v nasbíraných vzorcích nebyla obsažena. To je pro naše výsledky dobré, protože síra je nežádoucí prvek.

4.6.4 Spalné teplo a výhřevnost



Obrázek 35: Výsledné průměrné hodnoty spalného tepla vzorků ze smrku



Obrázek 36: Výsledné průměrné hodnoty výhřevnosti vzorků ze smrku

Pro výsledné stanovení, zda je dřevní biomasa vhodná pro následné využití pro výrobu energie, musíme znát hodnoty spalného tepla a výhřevnosti.

Na obrázku 35 a 36 jsou grafy s výslednými průměrnými hodnotami spalného tepla a výhřevnosti z měřených výřezů smrku. Z grafů můžeme vyčíst, že nedochází k příliš velkému výkyvu výsledných hodnot, čísla se liší jen o pár desetiny. Průměrné výsledné hodnoty pro teplotu u spalného tepla vyšly $20,19 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a výhřevnost $18,87 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

5 Diskuse a závěry

V bakalářské práci byly uvedeny technologie a techniky výroby elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů, které jsou v České republice využívány, přesněji sluneční energie, větrná energie, vodní energie, geotermální energie a energie z biomasy. U všech zmíněných obnovitelných zdrojů energie byl popsán princip výroby elektrické energie, typy elektráren a jejich rozdělení. Vzhledem ke geografickým podmínkám České republiky jsou zatím pro výrobu elektrické energie nejvíce využívány sluneční elektrárny a výroba energie z biomasy. V dnešní době mají na rozvoj obnovitelných zdrojů největší vliv finance a jejich nedostatek tento vývoj brzdí. Do budoucna lze předpokládat, že dojde k nárůstu počtu elektráren na obnovitelné zdroje, a to v první řadě především kvůli zdražení fosilních paliv a následně i celkovému vyčerpání veškerých zásob fosilních paliv.

V další části bakalářské práce bylo provedeno praktické měření a rozbor vybraných vzorků dřevní biomasy.

V měření jiných autorů vyšla hodnota původní vlhkosti vzorků smrku 11 % hm. Tato hodnota se velmi liší od hodnot naměřených autorkou práce, které vychází průměrná vlhkost 19,76 % hm. Původní vlhkost měřených vzorků je velice individuální, protože zde hraje roli více faktorů, které tuto hodnotu mohou ovlivnit, například stáří a uskladnění biomasy. Tyto informace nebyly v pracích jiných autorů uvedeny [28]. Odborná literatura udává, že obsah vody ve smrku se pohybuje okolo 20 % hm. [29].

Při měření, jež provedla autorka práce, byla nejvyšší hodnota prchavých hořavin 86,37 % hm. a průměr obsahu popela byl 0,37 % hm. V měření jiných autorů vyšla hodnota obsahu prchavé hořlaviny 88,5 % hm. [28]. Nejen výsledky práce autorky, ale i výsledky měření jiných autorů se shodují s odbornou literaturou, která uvádí, že obsah popela v sušině se pohybuje v rozmezí 0,5–1,1 % hm. [30].

V měření jiných autorů vyšly hodnoty stanovení kvalitativních parametrů v sušině takto: obsah uhlíku 50,1 % hm., obsah vodíku 6,13 % hm., obsah dusíku 0,12 % hm. a obsah kyslíku 43,1 % hm. [28]. Prvkové složení dřevní hmoty vychází velmi podobně a odchylky jsou vcelku zanedbatelné. Můžeme tedy říci, že výsledné hodnoty korespondují s naměřenými hodnotami jiných autorů i s odbornou literaturou [30].

Jiní autoři dosáhli výsledků spalného tepla $20,1 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a výhřevnosti $18,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Stejně jako u předchozích parametrů zkoumané dřevní biomasy i tyto hodnoty vyšly velmi podobně, zde se hodnoty liší v jednotkách setin [28]. V odborné literatuře je uvedeno, že výhřevnost smrkové biomasy se pohybuje v rozmezí $16,5$ až $18,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$ [30].

Z měření je zřejmé, že zplyňování je nejlepší volbou pro získání elektrické energie z kalamitního dříví. I když se zplyňovací technologie stále vyvíjí, má hned několik výhod, kterými jsou například: lepší využití plynného paliva a nízké emise oproti tuhým fosilním palivům. Výsledky měření dříví napadeného lýkožravým hmyzem vyšly podle očekávání. Spalné teplo a výhřevnost jsou sice menší než u hnědého uhlí, ale zase jsou vyšší než u pelet ze zemědělských produktů. Pro současné zplyňovací jednotky jsou stanoveny požadavky na kvalitu paliva, kde je zásadní výhřevnost, vlhkost a množství popelovin. Požadovaná vstupní vlhkost může být u některých zplyňovacích jednotek až 20 %, protože jejich součástí je sušící médium, jež sníží hodnotu vlhkosti na 10 % hm. Při zkoušce byla naměřena průměrná hodnota vlhkosti původních vzorků 19,76 % hm. Většina výrobců udává, že maximální obsah popela je do 1 % hm. U jednoho naměřeného vzorku vyšla hodnota 1,01 % hm., ale ostatní hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 0,28 % hm. do 0,38 % hm. obsahu popelovin v měřených vzorcích. Posledním parametrem je výhřevnost. Její optimální hodnota se pohybuje kolem 18 MJ.kg^{-1} . Průměrná hodnota u provedeného měření výhřevnosti byla $18,87 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Na základě výsledků provedeného měření můžeme tedy konstatovat, že všechny uvedené požadavky na kvalitu paliva byly splněny a kalamitní dřevo je vhodné jako biomasa, která by mohla být zpracována pomocí zplyňování k výrobě elektrické energie a výrobě tepla.

6 Seznam literatury

- [1] *Zákon o životním prostředí*. In: Sbírka zákonů čá 4/1992 Sb., 1992, 17/1992 Sb. Dostupné také z: <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf>
- [2] Obnovitelné zdroje energie. *Biom.cz* [online]. Zlín: Energetická agentura Zlínského kraje [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/obnovitelne_zdroje_energie_energeticka_agentura_zlinskeho_kraje.pdf
- [3] Formy sluneční energie. *Pozorování slunce* [online]. [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.pozorovanislunce.eu/slunce/energie-ze-slunce/formy-slunecni-energie.html>
- [4] Obnovitelné zdroje energie, Způsoby získávání elektrické a tepelné energie z obnovitelných zdrojů. *Envimod.fzp.ujep.cz* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně Fakulta životního prostředí, 2014 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/11e_final_tisk.pdf
- [5] Fotovoltaické elektrárny - princip funkce a součásti, elektrárny v ČR. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 2016 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti>
- [6] Podmínky pro solární systémy na ostrovech v oblasti středomoří. *Dspace5.zcu.cz* [online]. Brno: Ústav elektrotechnologie, VUT v Brně, 2012 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/5894/1/r6c1c7.pdf>
- [7] JAK FUNGUJE FOTOVOLTAICKÁ ELEKTRÁRNA. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobnizdroje/obnovitelne-zdroje/slunce/jak-funguje-slunecni-elektrarna>
- [8] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.

- [9] JAK FUNGUJE VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2020-10-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/vitr/jak-funguje-vetrna-elektrarna>
- [10] Geotermální energie. *Oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/geotermalni-energie>
- [11] Geotermální energie. *Publi.cz* [online]. [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/93/03.html>
- [12] Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *Oenergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>
- [13] VODNÍ TURBÍNA. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/vod_turb.html
- [14] ENERGIE VODY. *Ok1zed.sweb.cz* [online]. 2004 [cit. 2020-10-30]. Dostupné z: http://ok1zed.sweb.cz/s/el_vodniel.htm
- [15] Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *Oenergetice.cz* [online]. [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>
- [16] ZPRÁVA O STAVU LESA A LESNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ ČESKÉ REPUBLIKY V ROCE 2019 [online]. Ministerstvo zemědělství. Praha, 2020 [cit. 2021-04-07]. ISBN 978-80-7434-571-5. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/661268/Zprava_o_stavu_lesa_2019_WEB.pdf
- [17] Kůrovcová kalamita. <https://www.energyglobe.cz/> [online]. [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://www.energyglobe.cz/temata-a-novinky/kurovcova-kalamita>
- [18] MODLINGER, Roman a Kamil TRGALA. *Možné příčiny a důsledky kůrovcové kalamity v lesích Česka s ohledem na specifika při zpracování kalamitního dříví: odborná studie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2019. ISBN 978-80-213-2942-3.

- [19] TRÁVNÍČEK, Petr. *Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN ISBN978-80-7509-206-9.
- [20] Spalování biomasy. *Svět energie* [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/spalovani-biomasy/vyklad>
- [21] *Technologie zplyňování biomasy* [online]. In: [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4768435-Technologie-zplynovani-biomasy.html>
- [22] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. Zplyňování – principy a reaktory. *TZB info* [online]. VŠB – TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum, 2016, 25.1.2016 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [23] Fröling. *Rakouský výrobce vybavení pro topení dřevem a biomasou* [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://www.froeling.com/cs.html>
- [24] Volter. *Power from Wood I Green Electricity and Renewable Energy I Volter* [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://volter.fi/>
- [25] Burkhardt. *Combined Heat and Power Plants I Burkhardt Energy* [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://burkhardt-gruppe.de/en/homepage/>
- [26] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN ISBN978-80-213-1810-6.
- [27] OBROUČKA, Karel. *Termické odstraňování a energetické využívání odpadů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2001. ISBN 80-248-0009-8.
- [28] SKÁLA, Zdeněk a Tadeáš OCHODEK. *Energetické parametry biomasy: projekt GAČR 101/04/1278*. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-214-3493-6.
- [29] MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. 2., aktualiz. vyd. Brno: ERA, 2008. 21. století. ISBN 978-80-7366-115-1.
- [30] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

7 Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení obnovitelných zdrojů [4]	3
Obrázek 2: Schéma sluneční termální elektrárny [6]	4
Obrázek 3: Schéma fotovoltaického článku [7]	5
Obrázek 4: Schéma větrné elektrárny [2]	7
Obrázek 5: Oblast použití základních typů turbín [8]	8
Obrázek 6: Vodní turbíny – Francisova, Kaplanova, Peltonova [13]	10
Obrázek 7: Schéma přečerpávací elektrárny [14]	11
Obrázek 8: Schéma využití geotermální energie pro vytápění [10]	13
Obrázek 9: Schéma geotermální elektrárny [11]	14
Obrázek 10: Rozdělení biopaliv [4]	15
Obrázek 11: Skupiny zpracování biomasy [4]	15
Obrázek 12: Evidovaný objem smrkového kůrovcového dříví vytěženého v letech 2005–2019 (tis. m ³) [16]	21
Obrázek 13: Mapa evidovaného objemu smrkového kůrovcového dříví v České republice v roce 2019 [16]	21
Obrázek 14: Ukázka napadeného stromu lýkožravým hmyzem	22
Obrázek 15: Základní schéma zplyňování [21]	24
Obrázek 16: Schéma protiproudého reaktoru [22]	29
Obrázek 17: Schéma souprroudého reaktoru [22]	29
Obrázek 18: Schéma reaktoru s křížovým tokem [22]	30
Obrázek 19: Schéma zplyňovacího reaktoru s fluidním ložem [22]	31
Obrázek 20: Sbírání vzorků na Českolipsku	33
Obrázek 21: Laboratorní váha Sartorius SP124 S	35
Obrázek 22: Termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701	35
Obrázek 23: Detailnější foto kelímků	36
Obrázek 24: Kalorimetr LECO AC-600	36
Obrázek 25: Analyzátor LECO CHN628+S (vlevo), Analyzátor LECO CHN628 (vpravo)	37
Obrázek 26: Spalovací lodičky	38
Obrázek 27: Výsledné průměrné hodnoty původních vlhkostí vzorků ze smrku ..	38
Obrázek 28: Výsledné průměrné hodnoty snížených vlhkostí vzorků ze smrku ...	39

Obrázek 29: Výsledné průměrné hodnoty popela v % hm. vzorků ze smrku	40
Obrázek 30: Výsledné průměrné hodnoty prchavé hořlaviny v % hm. vzorků ze smrku	40
Obrázek 31: Výsledné průměrné hodnoty uhlíku v % hm. vzorků ze smrku.....	41
Obrázek 32: Výsledné průměrné hodnoty vodíku v % hm. vzorků ze smrku.....	41
Obrázek 33: Výsledné průměrné hodnoty dusíku v % hm. vzorků ze smrku.....	42
Obrázek 34: Výsledné průměrné hodnoty kyslíku v % hm. vzorků ze smrku	42
Obrázek 35: Výsledné průměrné hodnoty spalného tepla vzorků ze smrku.....	43
Obrázek 36: Výsledné průměrné hodnoty výhřevnosti vzorků ze smrku	43

Seznam tabulek

Tabulka 1: SWOT analýza zplyňovací technologie	20
--	----

8 Přílohy

Příloha č. 1

Oblast	Strom	Věková kategorie	Tloušťková kategorie	Původní vzorek									
				Vlhkost vzorku	Popel celkem	C	H v hořlavině	N	S	O v hořlavině	Prchavá hořlavina	Spalné teplo za konst. tlaku	Výhřevnost za konst. tlaku
				% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹
Liberec	Smrk	07–12 měs.	nad 40 cm	26,50	0,21	37,63	4,45	0,15	0,00	31,06	0,00	14,73	13,11
Liberec	Smrk	07–12 měs.	nad 40 cm	23,47	0,22	39,29	4,59	0,15	0,00	32,28	0,00	15,42	13,84
Liberec	Smrk	13–18 měs.	nad 40 cm	19,68	0,25	40,98	4,86	0,16	0,00	34,07	0,00	16,07	14,53
Liberec	Smrk	13–18 měs.	nad 40 cm	18,58	0,31	41,70	4,89	0,15	0,00	34,37	0,00	16,38	14,86
Liberec	Smrk	19–24 měs.	nad 40 cm	22,39	0,21	39,88	4,70	0,11	0,00	32,71	0,00	15,66	14,08
Liberec	Smrk	19–24 měs.	nad 40 cm	18,35	0,24	41,83	4,95	0,19	0,00	34,45	0,00	16,49	14,96
Liberec	Smrk	0–6 měs.	0–20 cm	17,03	0,26	42,81	5,06	0,15	0,00	34,69	0,00	16,81	15,29
Liberec	Smrk	0–6 měs.	0–20 cm	16,70	0,26	42,65	5,04	0,13	0,00	35,22	0,00	16,74	15,24
Liberec	Smrk	07–12 měs.	0–20 cm	21,88	0,28	40,21	4,74	0,15	0,00	32,73	0,00	15,80	14,23
Liberec	Smrk	07–12 měs.	0–20 cm	24,47	0,28	39,34	4,59	0,14	0,00	31,17	0,00	15,55	13,95
Liberec	Smrk	13–18 měs.	0–20 cm	18,27	0,28	42,65	4,90	0,14	0,00	33,77	0,00	16,72	15,20
Liberec	Smrk	13–18 měs.	0–20 cm	17,81	0,25	42,58	4,94	0,16	0,00	34,25	0,00	16,86	15,34
Liberec	Smrk	19–24 měs.	0–20 cm	15,85	0,25	43,44	5,06	0,12	0,00	35,28	0,00	17,07	15,57
Liberec	Smrk	19–24 měs.	0–20 cm	14,78	0,24	43,73	5,12	0,18	0,00	35,94	0,00	17,25	15,77
Liberec	Smrk	0–6 měs.	20–40 cm	21,04	0,23	40,64	4,74	0,15	0,00	33,20	0,00	15,88	14,33
Liberec	Smrk	0–6 měs.	20–40 cm	21,92	0,23	40,09	4,69	0,14	0,00	32,93	0,00	15,72	14,16
Liberec	Smrk	07–12 měs.	20–40 cm	20,16	0,31	41,10	4,80	0,14	0,00	33,49	0,00	16,08	14,54
Liberec	Smrk	07–12 měs.	20–40 cm	19,40	0,30	41,51	4,84	0,16	0,00	33,79	0,00	16,29	14,76
Liberec	Smrk	13–18 měs.	20–40 cm	21,58	0,24	40,43	4,76	0,14	0,00	32,86	0,00	15,87	14,31
Liberec	Smrk	13–18 měs.	20–40 cm	21,47	0,24	40,33	4,73	0,12	0,00	33,11	0,00	15,89	14,33
Liberec	Smrk	19–24 měs.	20–40 cm	15,25	0,24	43,51	5,14	0,18	0,00	35,68	0,00	17,04	15,55
Liberec	Smrk	19–24 měs.	20–40 cm	15,12	0,22	43,51	5,10	0,12	0,00	35,94	0,00	17,02	15,54
Liberec	Smrk	0–6 měs.	nad 40 cm	26,62	0,77	37,67	4,34	0,15	0,00	30,44	0,00	14,64	13,04
Liberec	Smrk	0–6 měs.	nad 40 cm	29,29	0,69	36,32	4,22	0,15	0,00	29,31	0,00	14,14	12,50

Příloha č. 2

Oblast	Strom	Věková kategorie	Tloušťková kategorie	Analytický vzorek									
				Vlhkost ze všech měření	Popel	C	H (vč. vody)	H v hořlavíně	N	S	O v hořlavíně	Spalné teplo za konst. obj.	Výhřevnost za konst. tlaku
				% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹
Liberec	Smrk	07–12 měs.	nad 40 cm	3,76	0,27	49,27	6,25	5,83	0,20	0,00	40,67	19,28	17,92
Liberec	Smrk	07–12 měs.	nad 40 cm	5,26	0,27	48,63	6,27	5,68	0,19	0,00	39,97	19,08	17,72
Liberec	Smrk	13–18 měs.	nad 40 cm	3,71	0,30	49,13	6,24	5,82	0,19	0,00	40,85	19,27	17,91
Liberec	Smrk	13–18 měs.	nad 40 cm	5,33	0,35	48,48	6,28	5,69	0,18	0,00	39,96	19,04	17,67
Liberec	Smrk	19–24 měs.	nad 40 cm	3,72	0,26	49,47	6,24	5,83	0,14	0,00	40,58	19,42	18,06
Liberec	Smrk	19–24 měs.	nad 40 cm	5,21	0,28	48,56	6,33	5,74	0,22	0,00	39,99	19,14	17,76
Liberec	Smrk	0–6 měs.	0–20 cm	4,00	0,30	49,53	6,31	5,86	0,17	0,00	40,14	19,45	18,08
Liberec	Smrk	0–6 měs.	0–20 cm	5,05	0,30	48,61	6,31	5,74	0,14	0,00	40,15	19,08	17,71
Liberec	Smrk	07–12 měs.	0–20 cm	4,23	0,35	49,29	6,29	5,82	0,19	0,00	40,12	19,36	17,99
Liberec	Smrk	07–12 měs.	0–20 cm	5,08	0,35	49,44	6,34	5,77	0,18	0,00	39,18	19,54	18,16
Liberec	Smrk	13–18 měs.	0–20 cm	5,05	0,32	49,55	6,25	5,69	0,16	0,00	39,23	19,42	18,05
Liberec	Smrk	13–18 měs.	0–20 cm	5,49	0,29	48,96	6,30	5,69	0,19	0,00	39,38	19,38	18,01
Liberec	Smrk	19–24 měs.	0–20 cm	4,23	0,29	49,44	6,24	5,76	0,13	0,00	40,15	19,42	18,06
Liberec	Smrk	19–24 měs.	0–20 cm	5,13	0,27	48,69	6,27	5,70	0,20	0,00	40,01	19,20	17,83
Liberec	Smrk	0–6 měs.	20–40 cm	4,16	0,28	49,32	6,21	5,75	0,18	0,00	40,30	19,27	17,91
Liberec	Smrk	0–6 měs.	20–40 cm	5,23	0,28	48,66	6,28	5,69	0,17	0,00	39,97	19,08	17,71
Liberec	Smrk	07–12 měs.	20–40 cm	4,03	0,37	49,40	6,22	5,77	0,17	0,00	40,26	19,32	17,97
Liberec	Smrk	07–12 měs.	20–40 cm	5,11	0,35	48,87	6,27	5,70	0,19	0,00	39,78	19,18	17,81
Liberec	Smrk	13–18 měs.	20–40 cm	3,91	0,30	49,54	6,27	5,83	0,17	0,00	40,26	19,45	18,08
Liberec	Smrk	13–18 měs.	20–40 cm	5,20	0,29	48,69	6,29	5,71	0,14	0,00	39,97	19,18	17,81
Liberec	Smrk	19–24 měs.	20–40 cm	3,89	0,27	49,35	6,26	5,82	0,20	0,00	40,46	19,32	17,96
Liberec	Smrk	19–24 měs.	20–40 cm	5,17	0,24	48,61	6,27	5,69	0,13	0,00	40,15	19,02	17,65
Liberec	Smrk	0–6 měs.	nad 40 cm	3,97	1,01	49,30	6,13	5,68	0,20	0,00	39,83	19,15	17,82
Liberec	Smrk	0–6 měs.	nad 40 cm	5,02	0,93	48,80	6,24	5,67	0,20	0,00	39,38	18,99	17,63

Příloha č. 3

				Suchý stav									
Oblast	Strom	Věková kategorie	Tloušťková kategorie	Popel	C	H	N	S	O	Prchavá hořlavina	Spalné teplo za konst. obj.	Spalné teplo za konst. tlaku	Výhřevnost za konst. tlaku
				% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹
Liberec	Smrk	07–12 měs.	nad 40 cm	0,28	51,20	6,06	0,20	0,00	42,26	86,51	20,04	20,04	18,72
Liberec	Smrk	07–12 měs.	nad 40 cm	0,28	51,33	6,00	0,20	0,00	42,19	85,91	20,14	20,15	18,84
Liberec	Smrk	13–18 měs.	nad 40 cm	0,32	51,03	6,05	0,19	0,00	42,42	86,04	20,01	20,01	18,69
Liberec	Smrk	13–18 měs.	nad 40 cm	0,37	51,21	6,01	0,19	0,00	42,22	86,07	20,11	20,12	18,81
Liberec	Smrk	19–24 měs.	nad 40 cm	0,27	51,38	6,05	0,14	0,00	42,15	85,65	20,17	20,17	18,85
Liberec	Smrk	19–24 měs.	nad 40 cm	0,29	51,23	6,06	0,23	0,00	42,19	86,14	20,19	20,19	18,87
Liberec	Smrk	0–6 měs.	0–20 cm	0,31	51,60	6,10	0,18	0,00	41,81	84,67	20,26	20,26	18,93
Liberec	Smrk	0–6 měs.	0–20 cm	0,32	51,20	6,05	0,15	0,00	42,29	85,74	20,10	20,10	18,78
Liberec	Smrk	07–12 měs.	0–20 cm	0,36	51,47	6,07	0,20	0,00	41,89	85,34	20,22	20,22	18,90
Liberec	Smrk	07–12 měs.	0–20 cm	0,37	52,09	6,08	0,19	0,00	41,28	85,18	20,58	20,59	19,26
Liberec	Smrk	13–18 měs.	0–20 cm	0,34	52,19	5,99	0,17	0,00	41,32	84,82	20,45	20,45	19,15
Liberec	Smrk	13–18 měs.	0–20 cm	0,31	51,81	6,02	0,20	0,00	41,67	86,44	20,51	20,51	19,20
Liberec	Smrk	19–24 měs.	0–20 cm	0,30	51,63	6,02	0,14	0,00	41,92	84,88	20,28	20,28	18,97
Liberec	Smrk	19–24 měs.	0–20 cm	0,29	51,32	6,01	0,21	0,00	42,17	86,14	20,23	20,24	18,93
Liberec	Smrk	0–6 měs.	20–40 cm	0,29	51,47	6,00	0,19	0,00	42,05	86,17	20,10	20,11	18,80
Liberec	Smrk	0–6 měs.	20–40 cm	0,30	51,34	6,01	0,18	0,00	42,17	86,34	20,13	20,13	18,82
Liberec	Smrk	07–12 měs.	20–40 cm	0,38	51,47	6,02	0,18	0,00	41,95	85,89	20,13	20,14	18,83
Liberec	Smrk	07–12 měs.	20–40 cm	0,37	51,50	6,00	0,20	0,00	41,93	85,44	20,21	20,21	18,90
Liberec	Smrk	13–18 měs.	20–40 cm	0,31	51,55	6,07	0,17	0,00	41,90	85,99	20,24	20,24	18,92
Liberec	Smrk	13–18 měs.	20–40 cm	0,30	51,36	6,02	0,15	0,00	42,16	86,16	20,23	20,23	18,92
Liberec	Smrk	19–24 měs.	20–40 cm	0,29	51,34	6,06	0,21	0,00	42,10	86,44	20,10	20,11	18,78
Liberec	Smrk	19–24 měs.	20–40 cm	0,26	51,26	6,00	0,14	0,00	42,34	86,30	20,05	20,06	18,75
Liberec	Smrk	0–6 měs.	nad 40 cm	1,05	51,34	5,92	0,21	0,00	41,48	82,57	19,94	19,95	18,66
Liberec	Smrk	0–6 měs.	nad 40 cm	0,98	51,37	5,97	0,21	0,00	41,46	82,86	19,99	19,99	18,69