

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta tropického zemědělství

Katedra udržitelných technologií



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta tropického
zemědělství**

Využití torefakce biomasy pro energetické účely

Bakalářská práce

2016

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tatiana Ivanova, Ph.D.

Vypracovala:

Kristina Sverkunová

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kristina Sverkunová

Trvale udržitelný rozvoj tropů a subtropů

Název práce

Využití torefakce biomasy pro energetické účely

Název anglicky

Torrefaction of biomass for energy use

Cíle práce

Bakalářská práce se zabývá tématem Využití torefakce biomasy pro energetické účely. Jedná se o poměrně nový způsob výroby vysoce výhřevných tuhých biopaliv, při kterém se jemnou pyrolýzou docílí vyšší výhřevnosti, větší hustoty energie a zlepšení dalších vlastností; výsledná paliva se dostává na hodnoty podobné hnědému uhlí.

Cílem práce je analýza informací o technologii torefakce biomasy včetně zhodnocení jejich výhod, omezení a potenciálu.

Metodika

Práce bude zpracována jako literární rešerše z aktuálních vědecko-výzkumných článků a studií ze světových databází. Pro prohloubení znalostí o peletách, briketách a dalších potřebných základů se použijí i české literární zdroje.

Literatura bude vyhledána dle klíčových slov.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

torrefaction, fast pyrolysis, biomass, pellets, carbonization, thermochemical process

Doporučené zdroje informací

- BATIDZIRAI, B., MIGNOT, A.P.R., SCHAKEL, W.B., JUNGINGER H.M., FAAIJ, A.P.C.. Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects. 2013. Energy, 62: 196-214
- GRANADOS, D.A., VELÁSQUEZ H.I., CHEJNE F. Energetic and exergetic evaluation of residual biomass in a torrefaction process. 2014. Energy, 74: 181-189
- NUNES, L.J.R., MATIAS J.C.O., CATALÃO J.P.S.. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. 2014. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40: 153-160
- POUDEL, J., OHM T-I., OH S.Ch. A study on torrefaction of food waste. 2015. Fuel, 140: 275-281
- RUDOLFFSON, M., STELTE W., LESTANDER T.A. Process optimization of combined biomass torrefaction and pelletization for fuel pellet production – A parametric study. 2015. Applied Energy, 140: 378-384

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FTZ

Vedoucí práce

Ing. Tatiana Ivanova, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra udržitelných technologií

Konzultant

Ing. Veronika Chaloupková

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2016

doc. Ing. Jan Banout, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2016

doc. Ing. Jan Banout, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 15. 04. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „Využití torefakce pro energetické účely“ jsem vypracovala samostatně. Všechny použité literární zdroje jsem řádně uvedla v referencích dle norem FTZ ČZU.

V Praze dne:

Kristina Sverkunová

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Bc. Tatianě Ivanové, Ph.D. za její odborné vedení při této bakalářské práci, za její trpělivost a cenné rady.

Abstrakt

Tato bakalářská práce, zaměřená na využití torefakce biomasy pro energetické účely se zabývala popisem této technologie, včetně základního popsání reaktorů, porovnává mokrou a suchou torefakci, popisuje materiály, které mohou být využity, se zaměřením na využití zemědělského odpadu. V práci jsem se rozepisovala o výhodách a nevýhodách torefakce, do čehož jsem zahrнула aspekty jako hydrofobnost, melitelnost či například emise skleníkových plynů.

Druhou důležitou částí práce je komerční využití technologie, kde jsem čerpala data primárně ze studie SECTOR, která má data z března roku 2016, takže se jednalo o skutečně aktuální informace. V této části jsem rozebírala možnosti rozvoje technologie skrz komerční uplatnění, kdy samozřejmě, platí, že technologie se rozvíjí rychleji, pokud se objevují obchodní zájmy. Skrz tuto část jsem také vysvětlovala důležitost norem, které v této chvíli nejsou přesně stanoveny.

V závěru práce jsem zmiňovala přínosy této technologie v současné době, kdy se řeší otázka vyčerpatelnosti fosilních paliv a jejich ekologičtější alternativ. Také jsem však vytkla problém týkající se uhlíkové stopy, jež se pojí s dovozem dřevního materiálu, který bude nutný, pokud má být v roce 2020 nasycená poptávka.

Abstract

The Bachelor thesis is focused on torefaction of biomass for an energy use. It describes the technology including basic reactors, compares wet and dry torefaction and used materials that can be used for an agricultural waste. In the thesis I compared advantages and disadvantages of torefaction considering all hydrophobic, grindability and emission of greenhouse gasses.

Second and the important part of the thesis is the recent commercial use of biomass. Data are mainly taken from the SECTOR study, which was made in March 2016. So it can be considered as a recent data. This part is also concentrated on possibilities of faster development of this technology thanks to the commercial use. It is also explaining the importance of norms, which have not been regulated yet.

The conclusion refers to the main assets of this technology, when the usage of fossil fuels and its more ecological substitutes are discussed. I mentioned the problem of a carbon footprint is connected to a possible raise of wood materials import, that will be unavoidable in order to satisfy expected demand for year 2020.

Obsah

1	Úvod	6
2	Cíle práce.....	7
3	Metodika.....	8
4	Literární rešerše	9
4.1	Úvod do torefakce.....	9
4.2	Torefakční technologie	11
4.2.1	Reaktory s přímým ohřevem	12
4.2.2	Reaktory s nepřímým ohřevem	16
4.3	Metoda suché a mokré torefakce	16
4.4	Zkoumané materiály	20
4.4.1	Zemědělské odpady	24
4.5	Výhody a nevýhody torefakce	25
4.5.1	Hydrofobnost	26
4.5.2	Melitelnost.....	27
4.5.3	Emise skleníkových plynů.....	28
4.6	Komerční užití	29
4.6.1	Výzkumný projekt SECTOR.....	33

1 Úvod

Pro získání energie z biomasy se používá mnoho způsobů, ať se jedná o technologie fyzikální, chemické, biologické či termické. Z těchto metod je termické zpracování nejvíce rozšířené. Spalování, zplyňování a pyrolýza biomasy, jakožto i spoluspalování biomasy a uhlí je široce využíváno za účelem získání tepla, elektřiny, plynu a biopaliv (Pohořelý, 2014). Podstatným krokem před užitím těchto metod je snížení obsahu vlhkosti v palivech, obecně čím nižší vlhkost obsahuje prvotní materiál (biomasa), tím vyšší je účinnost konverze. Také záleží na velikosti a tvaru materiálu (Chen et al., 2010).

Platí, že surová biomasa má vysoký obsah vlhkosti a nízkou hustotu energie v porovnání s fosilními palivy. Proto je použití surové biomasy těžko aplikovatelné – také se obtížně rozmělní na menší částice. Surová, neopracovaná biomasa je přirozeně hygroskopická, proto ji nelze skladovat delší časový úsek a účinnost biomasy je výrazně nižší (Svoboda et al., 2009).

Kombinace torefikované biomasy a zhušťování energie v ní má za následek vynikající vlastnosti pro využití biomasy v mnoha důležitých odvětvích (Park, 2012). Torefakce biomasy vykazuje vysoký obsah homogenity ve srovnání s neošetřenou surovou biomasou. Tato výhoda je skvěle využitelná, ať již pro samotný obchod, logistiku, skladování (Stelte et al, 2012).

I z těchto důvodů zájem o torefakci lignocelulózy stále roste a jedná se o předmět zkoumání mnoha výzkumu, ať jde o samotnou technologii, či o potenciál aplikace technologie.

2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce byla analýza informací, týkajících se torefakční technologie, včetně zhodnocení pozitiv a negativ, omezení která technologie přináší a samozřejmě i samotného potenciálu. Pro dosažení tohoto cíle byla vytvořena literární rešerše, která se kromě obecné analýzy základních informací zaměřila i na komerční možnosti a potřebu vytvoření norem, před zásadnějším vstupem technologie na trh.

3 Metodika

Pro literární rešerši byly nashromážděny a nastudovány podklady ze světových vědeckých databází, internetových zdrojů a několika studií. Materiály byly vyhledávány prostřednictvím databází jako je například ScienceDirect, Scopus a další. Primárně se jednalo o zahraniční zdroje.

Při hledání vhodné literatury bylo užito vybraných klíčových slov, například: torrefaction, pyrolysis, gasification, biomass, co-firing, grindability, lignin, reactor, moving bed.

Práce zahrnuje i několik cizích studií, pro větší pochopení problematiky.

4 Literární rešerše

4.1 Úvod do torefakce

Torefakce je procesem termického zpracování biomasy při teplotách mezi 200 a 300 °C, při podmínkách pomalé pyrolýzy (Medic, 2012). Proces probíhá při absenci kyslíku, využívá se hlavně pro výrobu unifikovaných pevných paliv se zlepšenými fyzikálně-chemickými vlastnostmi. Oproti spalování a zplyňování je tento pyrolýzní proces využíván pro vývoj inovačních technologií a založen na rozkladu organických látek působením tepla bez přístupu oxidačních médií (Jones et al., 2012).

Zpracování samo o sobě výrazně zlepšuje vlastnosti paliv na bázi biomasy – zvyšuje energetickou hustotu a výhřevnost, redukuje velikost částic, snižuje obsah vlhkosti, dále snižuje obsah kyslíku(O), vodíku (H) a naopak zvyšuje podíl uhlíku (C) ve složení (Acharya,2012). Zlepšuje se dlouhodobá skladovací stabilita (teplotní stabilizace biologicky rozložitelných materiálů), výrazné zvýšení hydrofobních vlastností biomasy, s tím spojená zvýšená rezistence vůči zpětnému vlhnutí. Spotřeba energie torefikovaného dřeva byla snížena o 50 až 85% v porovnání s čerstvým dřevem (Bergman, 2004).

Zlepšují se spalující vlastnosti pro energetické i materiálové zpracování (snadnější mletí produktu, drcení, jednodušší příprava pro zpracování v práškových a hořákových spalovacích a zplynovacích zařízeních). V následující tabulce č. 1 je znázorněno porovnání vlastností paliv – hnědé uhlí a pelety oproti torefikovaným peletám.

	Vyhřevnost [GJ/t]	Objemová Hmotnost [kg/m ³]	Obsah popela[%]	Obsah síry [%]	Odolnost proti vodě	CO ₂ neutralita
Torrefikované pelety	22 – 26	< 800	< 2	< 0,1	Ano	Ano
Dřevěné pelety	16 – 19	< 600	< 2	< 0,1	Ne	Ano
Hnědé uhlí	17 – 19	< 800	8 – 16	4 – 10	Ano	Ne

Tabulka 1: Porovnání některých vlastností paliv (torrefikované a dřevěné pelety, uhlí) (Stupavský, 2012)

Proces torefakce se skládá z více etap:

- **Ohřev biomasy na teplotu, při které začíná sušení** – zvyšování teploty, na konci dochází k sušení.
- **Předsušení do 100 °C** – při konstantní teplotě se vypařuje volná voda.
- **Ohřev na teplotu torefakce (méně než 200 °C)**- přenos tepla strukturou částice, chemicky vázaná voda není uvolňovaná, avšak malá ztráta vody je možná odpařením těkavých složek.
- **Vlastní torefakce** – štěpná chemická reakce (více než 200 °C) vede ke ztrátě chemicky vázané H₂O, uvolnění kondenzujících (H₂O, CH₃COOH) a nekondenzujících (CO₂, CO) těkavých produktů, jež jsou charakteristické pro různé složky biomasy (hemicelulóza, celulóza, lignin). Voda (H₂O) a kyselina octová (CH₃COOH) se uvolňuje z hemicelulózy.

Velký vliv na proces má teplota, jež má vliv na stupeň konverze a na složky biomasy podléhající termickému štěpení.

- <240 °C se převážně štěpí hemicelulóza
 - >250 – 260 °C začíná pozvolný rozklad ligninu a částečně celulózy
 - >300 °C začíná rozklad celulózy (nízkoteplotní pyrolýza)
- **Chlazení a stabilizace na pokojovou teplotu** – příprava materiálu pro další zpracování, skladování či dopravu (Pohořelý, 2014).

Hloubku procesu torefakce ovlivňuje několik důležitých parametrů.

- Teplota procesu (230-300 °C) – hloubka transformace, podíl pevné a plynné frakce stoupá s teplotou. Rozšiřuje se škála uvolňovaných sloučenin (C₅H₄O₂, CH₂O₂, C₃H₆O₃, CH₃OH), v plynu se objevuje i methan (CH₄). Teplota podstatně ovlivňuje i energetickou náročnost, zpravidla s rostoucí teplotou klesá náročnost a je zapotřebí méně energie.
- Doba ohřevu (180-30 min, dle teploty) – kontaktní doba je vázaná na způsob ohřevu, sdílená teplota uvnitř částic upravovaného materiálu ovlivňuje mechanismus štěpení. Doba ohřevu má na hloubku transformace menší vliv než teplota – za vyšší teploty

(>250°C) stačí krátká kontaktní doba, od 30 minut (Eseltine et al., 2013).

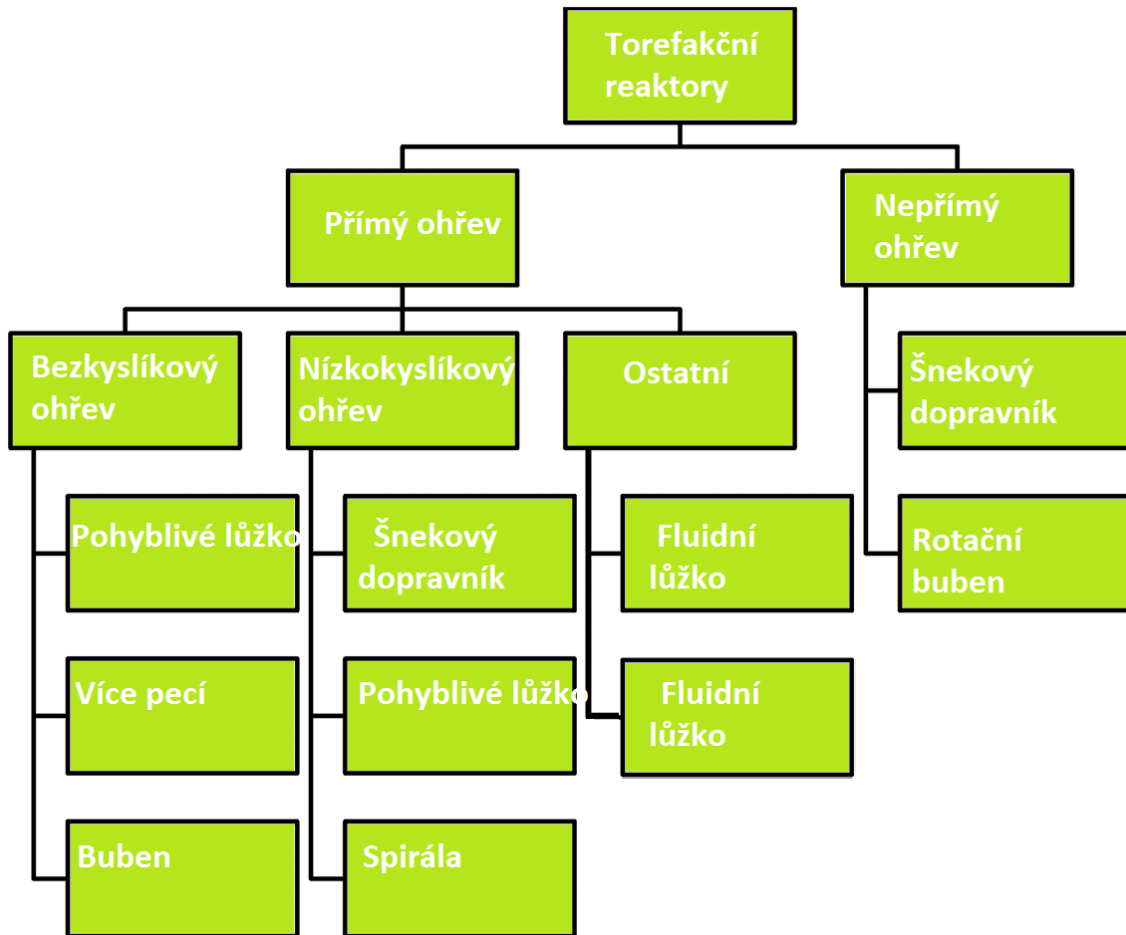
Torefakci aplikujeme různými způsoby, primárně se vždy jedná o výrobu paliva se zlepšujícími schopnostmi, jež umožňují jeho následné zpracování ve standardizovaném zařízení. Může se jednat o výrobu torefikovaných paliv z různých typů biomasy za pomoci rozličných technologických procesů, výroba torefikovaných pelet, použití lehce melitelných materiálů jako paliva pro zplyňovací generátory (nahrazení uhlí), speciálně pro použití v hořákových generátorech (Wannapeera, 2011). Dále využití integrovaných procesů zahrnujících torefakci dovoluje zvýšení celkové účinnosti procesu zplyňování ve srovnání se zpracováním neupravené biomasy podobným způsobem (Chew, 2012).

Technologii můžeme dělit na technologii přímo či nepřímo vyhřívanou. Proces s nepřímým ohřevem je realizován pomocí šnekového dopravníku, či bubnu (Sun, 2012). Metoda s přímým ohřevem se dělí na další kategorie – s užitím nekyslíkové či kyslíkové plynné smyčky. S užitím nekyslíkové plynné smyčky s výměníkem užíváme technologie pohyblivého lůžka, bubnu, více pecí či vibrační pás. Kyslíková plynná smyčka s hořákem užívá metodu pohyblivého lůžka a nebo metodu tunelu (Kleinschmidt, 2011).

4.2 Torefakční technologie

Torefakční reaktory dělíme dle přímého a nepřímého ohřevu. Technologie reaktoru přímého ohřevu se dále dělí na technologie s zahříváním v prostředí bez kyslíku, s nízkým kyslíkovým obsahem v prostředí a na třetí skupinu, jež bývá specifikována dle potřeb. Nepřímé ohřívání zahrnuje pouze jednu skupinu reaktorů.

Níže vidíme obrázek (č.1) popisující rozdělení reaktorů.



Obrázek 1 Rozdělení reaktorů (Dhungana, 2012)

4.2.1 Reaktory s přímým ohřevem

Často používaným reaktorem je pohyblivé lůžko. Tento mechanismu kombinuje proces sušení a torefikování (Chew,2012).

Surová pevná biomasa vstupuje do reaktoru jeho horní částí, kdy jsou částice prvně podrobeny sušení a následně samotné torefakci. Výsledný produkt vyjde ze spodní části

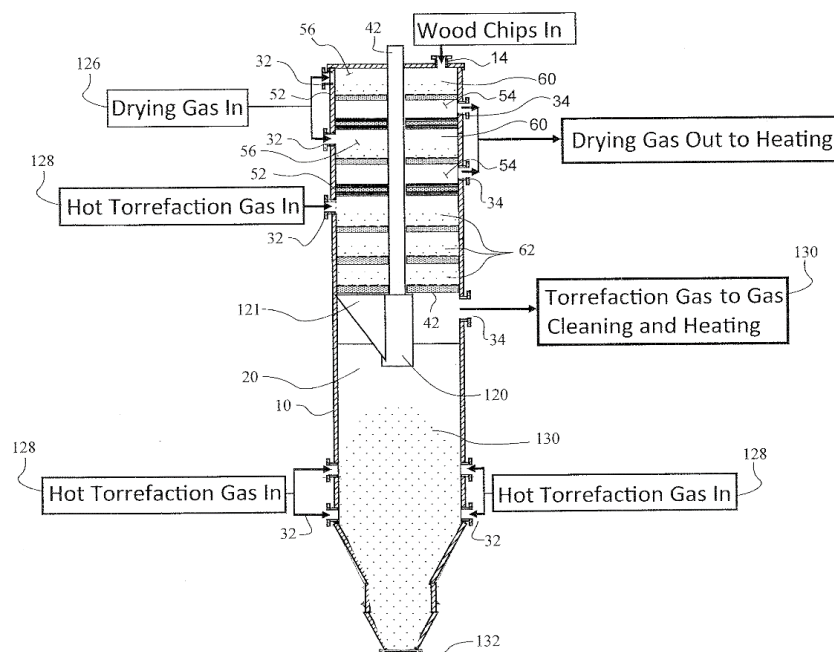
reaktoru. Neutrální horké plyny (bez kyslíku) se vpustí do dolní části reaktoru a následně stoupají nahoru. Tyto vložené plyny se vypouštějí v horní části reaktoru. Následně kondenzátor extrahuje vodní páru a další kondenzované plynné látky. Suchý plyn je poté spalován v hořáku pro vytvoření horkých plynů pro cirkulaci skrz reaktor. Na konci se přebytečný plyn filtruje, než je vypuštěn, aby nedocházelo ke znečištění prostředí (Batidzirai,2013).

Jak bylo zmíněno, částice biomasy se nasypávají do reaktoru skrz násypku v horní části reaktoru. Materiál se následně vede přes smyčku a zaplní celou délku sloupce. Ve spodní části reaktoru je násypka vedoucí k přechodové komoře a šnekovému dopravníku. Funkce šnekového dopravníku je ochlazování horkého torefikovaného materiálu na takovou teplotu, aby byla pod teplotou jeho vznícení. Jak se biomasa pohybuje ve válci dolů, prochází několika procesy a to ohříváním, sušením, opět zahříváním, torefakci a následně ochlazením šnekovým dopravníkem (Verhoeff et al., 2011)

Samotný reaktor se dělí na pět rozdílných zón (Tumuluru et al., 2010):

- Zóna 1 - Topná zóna až do teploty pro sušení
- Zóna 2 - Sušící zóna
- Zóna 3- Ohřev až na teplotu torefakce
- Zóna 4 - Samotný proces torefakce
- Zóna 5 – Ochlazení šnekovým dopravníkem

Níže vidíme náčrt reaktoru, viz obrázek č. 2.

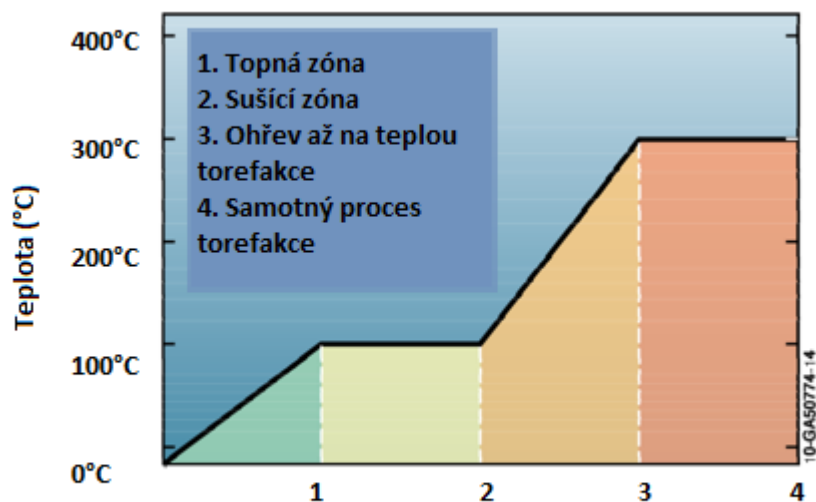


Obrázek 2 Schéma reaktoru (Eyer, 2013)

Výška sloupce reaktoru je určena průtokem materiálu a dobou pobytu biomasy v něm a v popsaných pěti zónách. Chladicí část nesouvisí s délkou pobytu, řeší se samostatně.

Grafy znázorňují teplotu a hustotu materiálů v průběhu pobytu v reaktoru, při průběhu zón 1-4, osa x je pobyt materiálu v každé zóně, dokud není reakce zakončena. Zóna 1 je část ve které probíhá předeřívání.

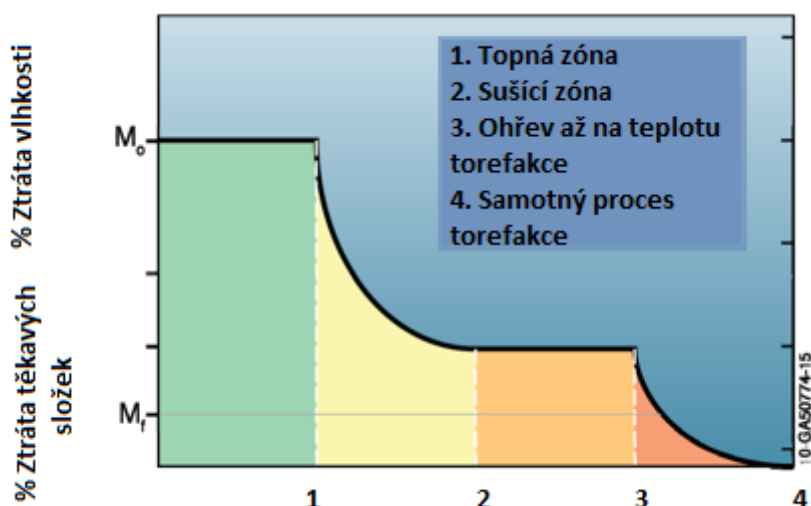
Obrázek č. 2 znázorňuje změnu teplot při procházení fázemi.



Obrázek 3 Změna teplot v závislosti na zónách. (Tumuluru, 2010)

Zde surová, mokrá a chladná biomasa prochází procesem zahřívání na potřebnou teplotu, při které proběhne sušení. Předpokladem je, že obsah vlhkosti zůstane nezměněn, než bude dosaženo teploty sušení 100°C (Prins et al., 2006). Při požadované teplotě ztrácí materiál zlomek své hmotnosti a také se vypařují těkavé látky (viz tabulka č.) Celková výška reaktoru je součtem vzdálenosti, jež biomasa projde při průchodu zónami 1 až 5. Metody k výpočtu pobytu a vzdálenosti pro každou zónu jsou popsány například ve studii Tumulura et al. (2010)

Na obrázku č. 3 vidíme znázorněnou ztrátu vlhkosti a těkavých látek při průchodu fází 1-4.



Obrázek 4 Změna obsahu v závislosti na fázích. (Tumuluru, 2010)

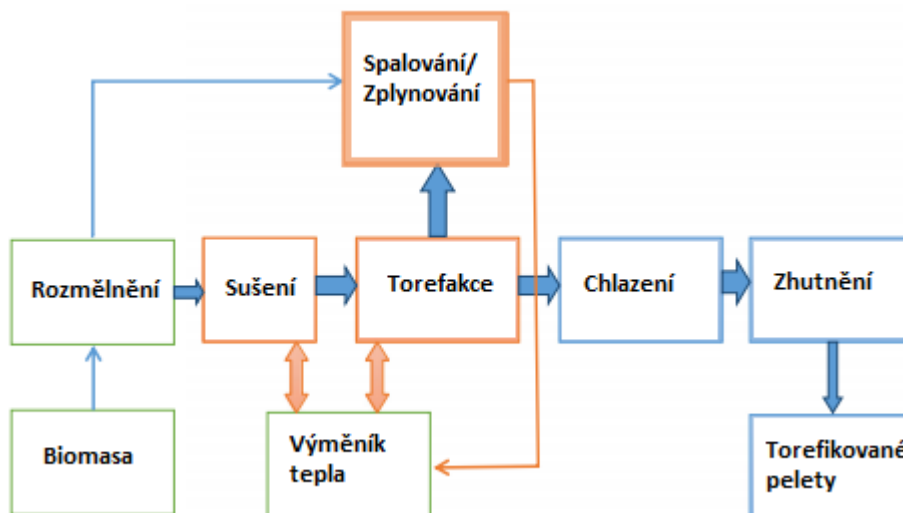
4.2.2 Reaktory s nepřímým ohřevem

Mezi reaktory s nepřímým ohřevem patří rotační bubne. Jedná se o kontinuální reaktor a považuje se za osvědčenou technologii pro různé aplikace. Pro proces torefakce může reaktor fungovat s přímým i nepřímým ohřevem s užitím horké páry či těkavých látek. Proces torefakce může být řízen s pomocí změnou teploty torefakce, změnou rotační rychlosti, a také délkou a úhlem bubnu. Rotace bubnu podporuje řádné rozdělení suroviny v lóži, takže teplota působí rovnoměrně, avšak tření zvyšuje jemnost fragmentu. Rotační válec má omezenou škálu použití, takže při potřebě vyšší kapacity je vyžadováno modulární nastavení (Koppejan, 2012).

4.3 Metoda suché a mokré torefakce

Suchá torefakce je plynný proces přeměny v teplotním rozmezí od 200-300°C, jež probíhá v inertním prostředí po dobu 30 až 60 minut. Během toto procesu se biomasa zahřívá rychlostí 50°C za minutu. Degradace hemicelulózy během tepelného zpracování způsobuje přeměnu hydrofilní biomasy na hydrofobní. Barva torefikované biomasy se mění až na tmavě hnědou (Sarvaramini et al., 2013). Jedná se o metodu popsanou v této práci, pokud není definováno jinak.

Na obrázku níže je popsán diagram suché torefakce.



Obrázek 5 Diagram suché torefakce.(Yan et al.,2010)

Mokrú torefakce je také termochemický proces při teplotách 180-265°C, při podkritickém podtlaku s kratší dobou rezistence. Hydrotermální torefakce používá podkritický stav vody obsažené v biomase, což znamená, že voda zůstává pod svým kritickým bodem 374°C a tlaku 22,1 MPa. Podkritický stav vody v kapalně formě má dobré vlastnosti rozpustnosti díky dielektrickému bodu a vysokou hustotu ve srovnání s plynným skupenstvím. S působením tepla kyselé ionty hydronia (H_3O^+) a základními ionty hydroxidu (OH^-) jsou vytvořeny prostřednictvím disociace (Markus,1999). V kritickém bodě látky se drasticky mění její vlastnosti a struktura.

Mokrú torefakce je také označována jako hydrotermální karbonizace nebo hydrotermální pyrolýza (Bach et al., 2013) Existuje několik způsobů, jak provést tuto metodu. Například, procesem přeměny při kterém je mokrá lignocelulózní biomasa zpracována v podkritickém bodě v tlakové nádobě (1-250 MPa) při teplotním rozmezí 180-265°C, v inertní atmosféře po rezistentní dobu počínající na pěti minutách až po několik hodin (Xiao,2012). Další způsob využívá horkou vodu, tuto metodu nazýváme extrakce horkou vodou (Yan et al., 2009), dále existuje metoda autohydrolyzy, vodní hydrolyza, hydrotermální karbonizace, tlakové vaření, vodní frakcionace a další.

V průběhu mokré torefakce je hemicelulóza obsažená v biomase depolymerována hydrolyzou a přeměněná na monomery a oligomery. Během tohoto procesu probíhá minimální dopad na lignin, díky čemuž se následně vytvoří pevný biouhel se sníženým obsahem rovnovážně vlhkosti ve srovnání se surovou biomasou (FUNKE et al.,2010).

Mokrá torefakce je značně využitelná pro biomasu, jež obsahuje velké množství vlhkosti (50% a více, existují ale i výjimky), protože se vzorky smísí s vodou již před procesem mokré torefakce. Biomasa v tomto procesu musí být smíchána s dostatkem vody, aby byly vzorky dostatečně nasáklé vodou (platí poměr suché biomasy a vody 1:6), již před započítáním procesu. Vzhledem k tomuto způsobu přípravy biomasy není potřeba předběžné sušení surové biomasy. Následně jsou vzorky nasáklé biomasy torefikovány v horké, stlačené vodě v reaktoru při podkritických podmínkách a teplotě 180-265°C, samozřejmě v inertním prostředí, jež naplňuje zbytek reaktoru. V průběhu reakční teploty je sledován a upravován tlak. Následným výsledkem tohoto procesu je torefikovaný produkt, jež se následně upravuje. Tento produkt obsahuje biouhel, vodu, těžké kyseliny, cukry, plyny (CO₂) (Yan et al.,2010). Následně se oddělí biouhel od vody přes filtr, umístí se do exsikátoru k chlazení a sušení. Potřebná energie k těmto postupům může být získána užitím odpadního tepla z torefakčního reaktoru.

Pro literární rešerši je nejpodstatnější porovnání těchto dvou způsobů torefakce. Funke et al. (2010) provedl porovnávací studii, kdy srovnával suchou a mokrou torefakci, se zaměřením na hmotnost produktu, náklady, popílek. Mokrá torefakce je považována za netoxický proces, také vychází levněji než zmiňovaná suchá torefakce, což se týče chemického reaktoru – i díky těmto důvodům se v posledních letech obrací zájem právě na vývoj a rozvoj mokré torefakce. Samotný proces je netoxický díky vstupním surovinám, jedná se totiž pouze o čistou biomasu, vodu a inertní plyn, avšak také vyžaduje pouze destilovanou vodu, proto je potřeba brát v potaz, že voda je jedním z nejcennějších zdrojů, které máme a je potřeba omezit plýtvání této suroviny. Výsledná kapalina po torefakci obsahuje stopy alkalických sloučenin, což je zátěž pro životní prostředí při následném zpracování a likvidaci této kapaliny (Acharya,2015). Tento problém, dle zdrojů použitých v rešerši, není v současnosti řešen ve výzkumu.

Mokrý torefakce má oproti suché torefakci větší výhřevnost výsledného produktu, který pak také obsahuje snížené množství anorganických sloučenin – to díky rozpustnosti organických a anorganických složek při podkritickému tlaku vody při zpracování, což také výrazně snižuje obsah soli a minerálních látek přirozeně obsažených v biomase (Montano,2012).

Produkt ze suché torefakce vyžaduje při vstupu vysušenou biomasu, s vlhkostí pod 15% - což je i nejvyšší výhoda mokré torefakce, kdy tento požadavek odpadá. Kromě zmiňované vyšší výhřevnost, je také při mokré torefakci potřeba menší časový úsek na proces. Oba způsoby vytvářejí produkt, jež je vhodnější než použití surové biomasy, co se týče spalování s uhlím. Tyto produkty, jak již bylo zmiňováno, mají také větší hustotu, jsou přirozeně hydrofobní a jsou lépe uzpůsobené k mletí, díky čemuž vyžadují méně energie (Phanphanich, 2010).

Torefikované pelety mohou být užité v průmyslu, kde se v současnosti používají dřevěné pelety (uhelné elektrárny). Při spalování je možné použít společně torefikované a dřevěné pelety, kdy torefikované biomasy může být až 50% - avšak existují technická omezení, jež přechod na tuto optimalizaci zpomalují – například je potřeba provést změny v napájecí fázi kotle. (Dai et al., 2008) Torefikovaná biomasa může být kromě v průmyslu použita i v domácnostech. Také, ačkoliv se jedná o méně známý a probíraný aspekt, torefikovaná biomasa může být užita pro zlepšení úrodnosti půdy, ve formě popílku (Müller-Stöver et al., 2012)

Je třeba si uvědomit, že mokrá torefakce je stále ve fázi zkoumání a vývoje, vzhledem k technickým problémům, jež byly vyzorovány během užití v provozu. Při snaze o komercializaci je potřeba dalšího výzkumu v oblasti reaktoru, jež zvládne potřebný vysoký tlak při zpracování. Také je potřeba více se zaměřit na rozvoj studií týkajících se využití odpadu, jež vzniká při spalování torefikovaného materiálu spolu s dřevními peletami (hnojení půdy).

Z dostupných informací vychází teze, že mokrá torefakce má sice lepší výsledky, avšak v současné době je výhodnější používat suchou torefakci, z důvodu lepší znalosti procesu.

Rozhodně je potřeba pozitiva a negativa těchto metod podrobit dalšímu výzkumu, pro lepší výchozí informace.

4.4 Materiály

Správně vybraná vstupní surovina je taky podrobena větší diskuzi. Co se týče samotné práce, nejčastěji zmiňují pelety. Ty mají své členění, dle Ministerstva průmyslu a obchodu (2013) se pelety dělí na:

- **Pelety ze stébelnin** – lisovány za vysokého tlaku, z vysušené, nadrcené či nakrátko nařezané stébelniny (sláma, obiloviny, olejniny, energetické byliny, travniny) Pelety mají následně tvar válce. Výhřevnost se pohybuje v rozmezí 16,5 -17,5 MJ.kg⁻¹.
- **Dřevěné pelety** – vyráběny z dřevních odpadů z dřevozpracujícího průmyslu (piliny, hobliny, obrusný prach, odřezky). Při výrobě nejsou potřeba žádná pojiva, dřevní materiál obsahuje lignin, jež pelety pojí. Pelety se vyrábí mechanickým stlačením, do tvaru válečků. Výhřevnost je 16,5-18,5 MJ.kg⁻¹. (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2013)

4.4.1 Zkoumané materiály

Pelety se spojují i po procesu torefakce. Proto je potřeba brát v potaz vstupní surovinu do torefakčního procesu, ať již z pohledu ekonomického či následné pojivosti a samozřejmě také, pro vstupní suroviny zvolit správný a nejvhodnější postup torefakce. V roce 2010 proběhl výzkum pod záštitou Národní univerzity v Taiwanu pod vedením Wei-Hsin Chen a Po-Chieh Kuo. Výzkum zahrnoval testování čtyř surových biomas – bambus, vrba, kokosová skořápka a dřevní materiál fikus malolistého (*Ficus bejnamina L.*). Po

dokončení analýzy torefikovaných vzorků se na surovou biomasu použila termogravimetrická analýza. Vzorky byly sušené při teplotě 60°C po dobu 24 hodin, aby posloužili jako srovnávací hodnoty. Po skončení procesu sušení byly vzorky rozmělněny na velikost částic v rozměru 0,42 mm. Takto připravená surovina byla umístěna do plastových pytlů a skladována v exsikátoru při pokojové teplotě, dokud nebyla provedena celková analýza torefikovaných produktů biomasy.

Vlastnosti pyrolýzy a torefakce byly analyzovány na čtyřech vzorcích biomasy opět pomocí termogravimetrie. Vzorky biomasy byly umístěné dovnitř termogravimetru, jež je vystaven tepelnému namáhání a na citlivých mikrováhách se měří následné změny dynamiky hmotnosti vzhledem k času a době pobytu. Pro každé měření bylo použito cca 5 mg vzorku a teplota zahřívání se pohybovala mezi 25 až 800°C. Změny byly zaznamenávány v frekvenci 2 Hz, což ve výsledku činilo 120 hodnot teplot za minutu. Byla použita inertní atmosféra, kdy byl aplikován dusík, díky čemuž se docílilo pyrolýzy bez přístupu kyslíku. Průtok dusíku činil 200 cm³ za minutu.

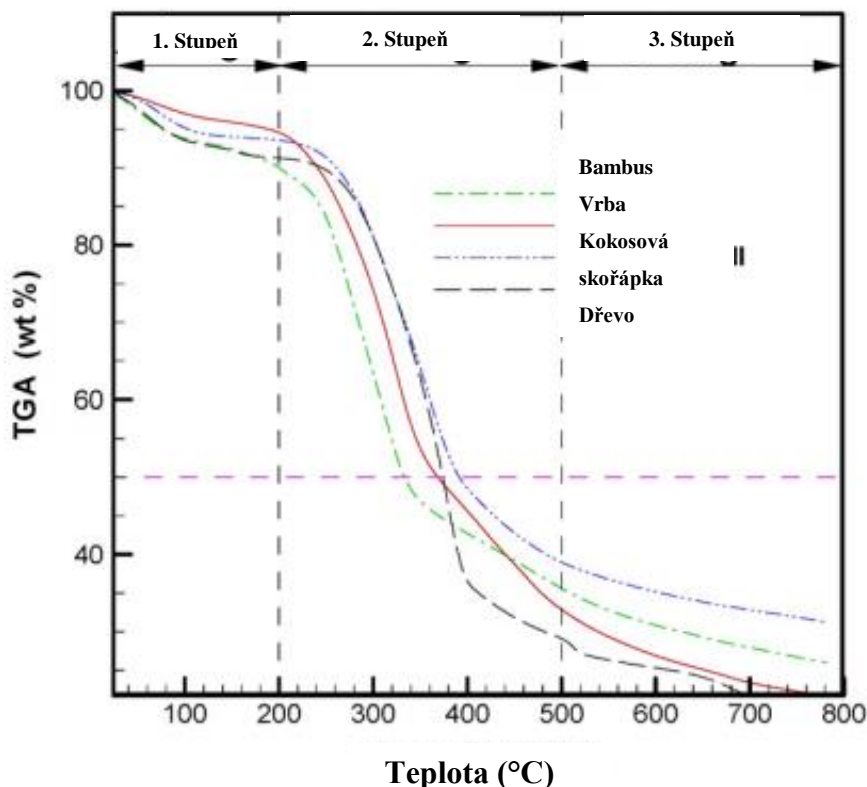
Když byl proces pyrolýzy ukončen, rychlost ohřevu v termogravimetru při kontrolované teplotě činila 20°C za minutu, neboli po provedení torefakce se teplota konstantně periodicky zvyšovala. Čili, teplota v termogravimetru se z původních 25°C zvýšila až k hodnotám mezi 240 a 275°C, s teplotním nárůstem 20°C.min⁻¹. Jakmile bylo dosaženo teploty potřebné pro samotný proces torefakce, byla biomasa další dvě hodiny ponechána zpracování v tomto procesu, znovu při teplotním ohřevu 20°C.min⁻¹.

Podle zaznamenaných hodnot týkajících se ztráty hmotnosti se provedla termogravimetrická analýza (TGA) a derivační termogravimetrická analýza (DTG). Aby byla zaručena kvalita měření, termogravimetr byl periodicky kalibrován za použití india (In) a cínu (Sn). Také byl pro kontrolu použit šťavelan vápenatý (CaC₂O₄).

V prvním stupni měření (teplota < 200°C), kdy je hmotnost vzorků snížena díky proceduře sušení a uvolňování těkavých látek je ztráta hmotnosti menší než 10%.

V druhém stupni měření (teplota mezi 200 a 500°) je zaznamenán větší úbytek váhy, z důvodu tepelného rozkladu hemicelulózy, celulózy a ligninu. V této fázi měření testovaných materiálů je hmotnost snížena o 40%.

V posledním, třetím stupni již není váhová změna tolik znatelná oproti předešlým fázím, hlavně z důvodu rozkladů těžších složek v biomase.

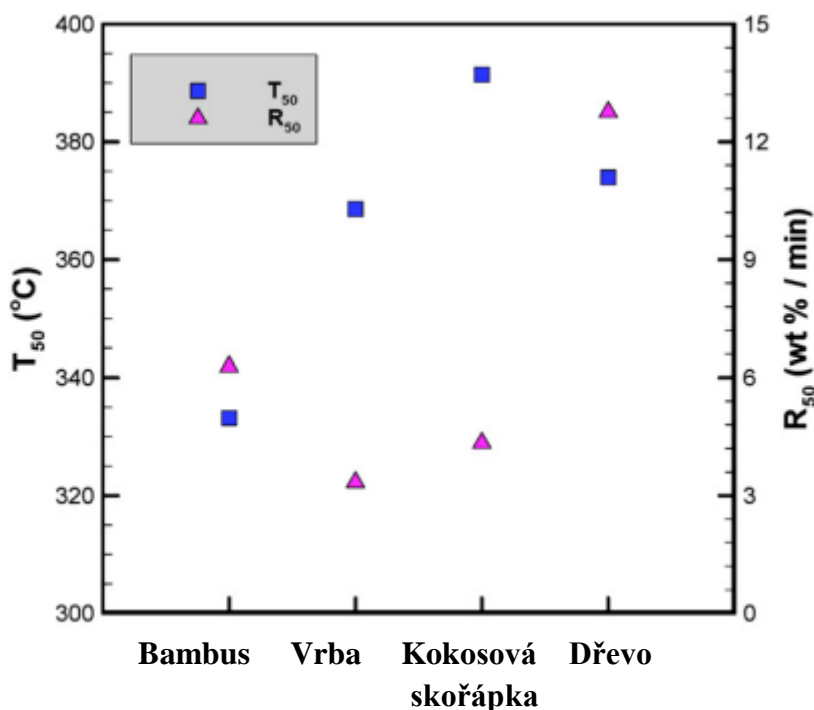


c

Obrázek 6 Distribuce TGA v pyrolyzním procesu.. (Chen, 2010)

Pro vytvoření komplexního porovnání ztráty hmotnosti vzorků biomasy, se studie soustředila na dva ukazatele T50 a R50. Tyto ukazatele vyjadřují teplotu a hustotu viz tabulka č, kde jsou zaznamenány hodnoty graficky. Původní i stávající hodnoty zobrazují teplotu, při které se ztrácí 50% váhy (hodnocení ztráty váhy a rychlosti úbytku – T50). Tabulka č. poukazuje na to, že vysoká hodnota R50 znamená, že biomasa je relativně aktivní na hodnotách T50. Celkově, hodnota T50 se pohybuje v rozmezí 333-391°C, což nám dokazuje, že ke ztrátě hmotnosti okolo 50% dochází, pokud je teplota vyšší než 400°C, a rychlost zahřívání v termogravimetru je 20°C.min⁻¹.

K hodnotě T_0 koresponduje hodnota R_{50} mezi 3,34 a 12,76% min^{-1} . Hlavním poznatkem je, že R_{50} (hmotnostní podíl) u vzoru dřeva je mnohem vyšší, než u dalších tří zkoumaných vzorků, z čehož vyplývá, že míra úbytku hmotnosti dřeva je poměrně razantní okolo T_{50} . Tento fakt, vyplývá i ze skutečnosti, že tepelný rozklad dřeva je charakterizován rychlým poklesem v druhém stupni měření, jak je uvedeno výše, viz tabulka č.



Tabulka 2 Profily T_{50} a R_{50} čtyř testovaných biomas v pyrolýzním procesu..(Chen, 2010)

Dále se studie zabývala kromě studia váhového úbytku dopadem procesu torefakce na lignocelulóзовou strukturu. Získané výsledky z TGA a DTG poskytly kvalitativní vhled do vztahu mezi hemicelúózou, celúózou a ligninem. Jak je rozebráno výše, proceduru ztráty váhy můžeme rozdělit do tří stupňů. Také byly použity dva způsoby torefakce. Jemná, při teplotě 240°C asilná při teplotě 275°C. Hemicelúóza a celúóza reagovala především při dosažení teploty mezi 200-400°C. Jemná pyrolýza měla velký vliv na úbytek hemicelúózy, nikoliv na celúózu a lignin.

Přes 60% váhy biomasy bylo zachováno při procesu jemné torefakce (pyrolýzy). Proto tento typ torefakce je nejvhodnější pro výroby biopaliva.

Závěrem této studie je, že silná torefakce se rozhodně nedoporučuje pro úpravu biomasy pro energetické účely, kde vyžadujeme zintenzivnění energetické hustoty. (WEI-HSIN CHEN, PO-CHIH KUO, 2010). Co se týče materiálu, nejlepší výsledky úbytku hmotnosti a naopak zhuštění energie, byly prokázány u dřevního materiálu fikusu malolistého.

4.4.2 Zemědělské odpady

Pro torefakční proces mohou být využité i zemědělské odpady. Jedná se o biomasu s malým obsahem síry a dusíku a hlavně, jedná se o vstupní materiál, jež je CO₂ neutrální. Jedná se o zdroje jako sláma, palivové dřevo a další druhy organických odpadů (Deng et al., 2009). Například v Číně představují zemědělské odpady 72,2% celkových zdrojů pro energii z biomasy (Chen, 2008). Efektivní zpracování zemědělského odpadu jako biomasy je každým dnem důležitější než kdy jindy, z důvodu nedostatku fosilních paliv, jelikož na rozdíl od biomasy se nejedná o obnovitelné zdroje. Také nesmíme zapomenout na environmentální dopad využívání fosilních paliv.

I přesto, existuje stále mnoho překážek, jež brání ve větším využívání zemědělského dopadu jako vstupní produkt pro torefakční reaktor, jedná se o základní vlastnosti biomasy. Samozřejmě, obsah vlhkosti a nízká výhřevnost surové biomasy ovlivňuje účinnost spalování a pyrolýzy (Yaman, 2004). Dále, jak bylo zmiňováno v textu, lignocelulózní materiály jsou problematické, co se týče broušení a melitelnosti. Také je potřeba řešit otázku dehtu při pyrolýzním procesu. Samotná biomasa má velký objem a neodpovídající hustotu vůči objemu, na což navazuje i problém logistiky (Rentizelas, 2009). Většinu těchto překážek samotná torefakce snadno řeší, kdy se z biomasy vytvoří biouhel (Agar, 2012). Ovšem zásadním problémem je sezónní dostupnost zemědělské biomasy, což může vytvořit problém u vysoce účinných reaktorů, jež potřebují velké množství vstupní suroviny (Deng et al., 2012). Z dostupné rešerše a dle mého názoru vyplývající z ní, by se tento problém dal řešit kombinací zemědělské biomasy s další – například průmyslovým odpadem (piliny atd.)

4.5 Výhody a nevýhody torefakce

Každý alternativní zdroj energie má svá pozitiva i negativa. Co se týče torefakce, obě dvě strany jsou poměrně vyrovnané, avšak bližší zkoumání by mohlo přinést nové informace, jež by mohly pozměnit pohled na tento mechanismus.

Pozitiva procesu je rozšíření palivové základny, vysoká energetická hustota produktů, snížené zadržování vody (hydrofobicita – jeden z nejzajímavějších aspektů), snížená možnost biodegradace, zlepšení následné úpravy a nižší náklady na přepravu a skladování. U konkrétních typů biomasy snižuje torefakce náklady na mletí. Tím dochází ke snížení množství energie potřebné pro rozemletí částic různých typů paliv v závislosti na teplotě samotné torefakce. (Ciolkosz a Wallace, 2011)

Z negativ se nejčastěji upozorňuje na možnost samovznícení (při teplotách 150-170°C) (Englisch, 2011), riziko výbuchu je vyšší ve srovnání s konvenční biomasou, avšak dle současných znalostí, nižší ve srovnání s uhlím. Ačkoliv jsou náklady na přepravu nižší, je samotná přeprava obtížnější (pelety, brikety). (Searcy et al., 2014)

Je potřeba definovat dodatečné vlastnosti paliv – stupeň torefakce, hydrofobicita, melitelnost, odolnost vůči biodegradaci a další kritéria udržitelnosti. V základu je potřeba vytvořit ekologické normy, jež budou tento výsledný produkt regulovat již při výrobě, aby se následně jednalo o co nejmenší environmentální zátěž.

4.5.1 Hydrofobnost

Jednou z podstatných nevýhod biomasy je přítomnost vlhkosti, která má za následek zhoršení spalování, zejména pokud se jedná o termochemické procesy. Hydrofobní vlastnosti torefikovaných materiálů se samozřejmě zkoumají a to dvěma způsoby, testem ponoření nebo analýzou obsahu rovnovážné vlhkosti (EMC) (Felfli, 2005). Při ponorném testu se porovnává torefikovaná a surová biomasa, kdy oba vzorky jsou ponořeny ve vodě po určitý, předem stanovený, čas. Následná hydrofobnost je posuzována dle celkové absorpce vlhkosti vzorkem v poměru ke své původní hmotnosti. Rovnovážený obsah se měří v exsikátoru pomocí nasyceného solného roztoku, abychom dosáhli požadované vlhkosti. Té bylo dosaženo v kombinaci vodní lázně, konstantní vlhkosti prostředí a správně zvolenou teplotou. Testovaný vzorek dosáhne rovnovážného stavu měření ve chvíli, kdy měřená hmotnost je již po dobu měření konstantní, čili vzorek je nasycen.

Absorpce vlhkosti torefikovaného vzorku je poměrně nižší než u surové, neošetřené biomasy (Felfli, 2005). Zde ovšem záleží na užití teplotě při torefikování. Absorpce vlhkosti je nižší pro vzorky, jež jsou projity větší teplotou. Vliv torefakční teploty na rovnovážný obsah vlhkosti byl zkoumán přes relativní vlhkost v rozmezí 11,3-97,0% (Yan, 2009; Acharjee, 2011). Výsledky byly získány pro test ponoření, přičemž biomasa od základu měla sníženou afinitu k vlhkosti v porovnání se surovou biomasou. Model EMC byl použit na porovnání naměřených dat a snížená adsorpční kapacita dopomohla k závěru se zvyšující teplotou (Vásquez, 2009; Acharjee, 2011). Při dosažené torefakční teplotě je voda hlavní uvolňující se složka, spolu s těkavými látkami. Samotné sušení biomasy proto začíná na 100°C, aby se odstranila volná voda ve vstupní surovině. Lehké organické těkavé látky se uvolňují v následujících fázích sušení, díky uvolnění molekul H₂O. Tím, že se teplot postupně zvýší na 200°C, uvolní se vázaná voda v surovině. Depolymerizace dlouhých polysacharidových řetězců zkracuje polymerní struktury

biomasy, především co se týká hemicelulóзовých frakcí. To se pojí s omezeným výparem těkavých složek a karbonizací ligninu a celulózy. Během torefakce dochází k porušení hydroxylové skupiny na celulóзовých mikrofibrilních monomerech, jež představují hydrofobní vlastnosti torefikované biomasy (Svoboda, 2009).

Tato nevratná akce zachovává kvalitu výrobku, jelikož molekuly v torefikovaném produktu jsou nepolární a prodlužují dobu skladování (Sadaka, 2009). V důsledku toho, se proces spalování torefikované biomasy stává exotermní a vznícení torefikovaného vzorku bude požadovat výrazně méně času než surová biomasa. Výše uvedené zlepšené vlastnosti torefikované biomasy jsou vyhovující pro dopravu, skladování a samotné využití, z důvodu vyšší stability a odolnosti vnějším podmínkám.

4.5.2 Melitelnost

Skrz rozklad hemicelulózy spolu s depolymerací celulózy a tepelného změkčení ligninu se orientace mikrofibril přemístí v průběhu tepelného zpracování. Buněčná stěna je totiž po torefakci značně oslabená. Tato zvýšená křehkost a drobivost zlepšuje melitelnost biomasy (Wang, 2011).

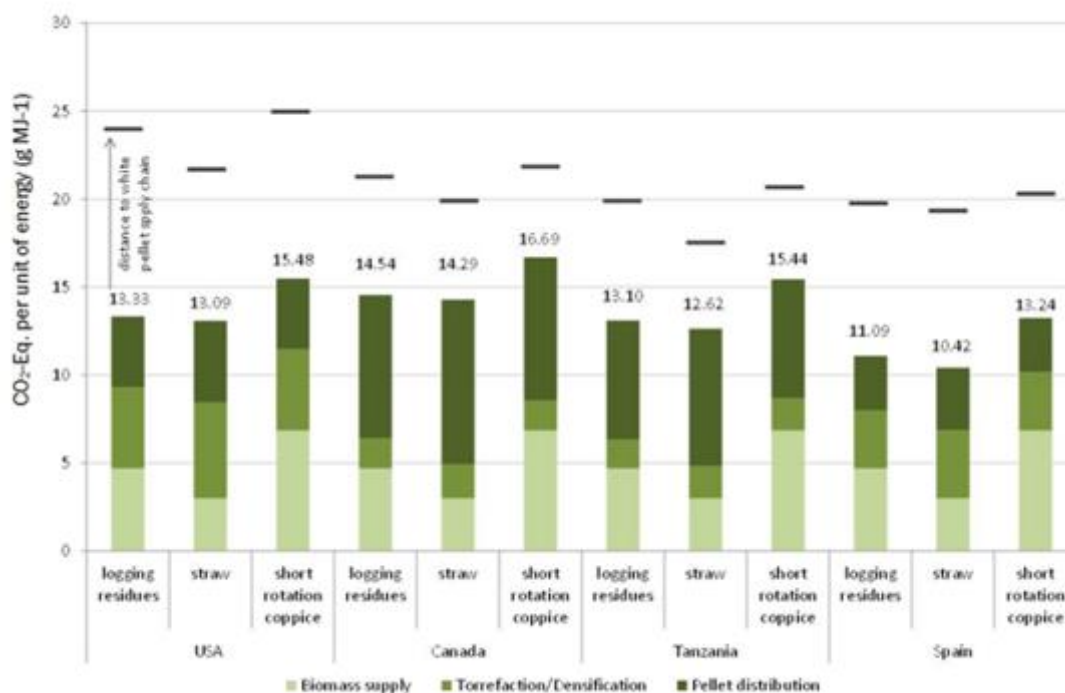
Lehká melitelnost je často pozorovaným aspektem. Široce se zkoumá distribuce částic namletých vzorků, dle výběru velikostí. Platí, že melitelnost částic se výrazně zlepší po projití procesem torefakce na základě zvýšeného procenta jemných částic (Chen, 2011). Alternativní metoda distribuce částic je spojená se spotřebou energie potřebnou pro proces melení. Měrná spotřeba energie pro torefikovanou biomasu je snížena až desetkrát oproti surové biomase (Phanphanich, 2010). Zlepšení melitelnosti biomasy je svázaná s úbytkem vázané vody a transformací ligninu při nižší teplotě. Následně také závisí na tepelné degradaci buněčné stěny biomasy, přispívá k vyššímu procentu jemných částic po torefakci, jak již bylo uvedeno. Jedná se o dvoustupňový mechanismus.

Pro posouzení melitelnosti se používá Hardgrove Grindability Index (HGI).

4.5.3 Emise skleníkových plynů

Tuhá biopaliva jsou považována za nosiče s nízkým cyklem emisí skleníkových plynů (BASU, 2013). Tento fakt je podstatným argumentem při zavádění této technologie do průmyslu. Tento aspekt byl zkoumán v projektu SECTOR (viz kapitola 4.1). Hodnocení probíhalo s ohledem na skutečné údaje, s použitím dat získaných v průběhu projektu. Tato data umožnila podrobné posouzení, jež by nebylo možné z běžně dostupných dat a publikací. V závislosti na použité mase a energetické bilanci byly emise stanoveny za použití metodiky LCA, odpovídající normám ISO 14044:2006 a ISO 14040:2006.

Graf č. níže vyobrazuje emise skleníkových plynů za hodnotu 1 MJ (měrná jednotka) pro tři druhy dodávaných pelet a to z různých vstupních surovin, slámy, vrby a zbytků z těžby, z různých zemí, Španělsko, USA, Tanzanie a Kanada.



Obrázek 7 Co₂ emise z torefikovaných materiálů. (Thrane et al., 2016).

Výsledky poukázaly, že v důsledku vyšší hustoty energie obsažené v torefikovaných peletách, je samotná logistika šetrnější k životnímu prostředí, ve srovnání s dopravou běžně používaných pelet. Zmiňovaná studie Sectoru (2016) poukazuje na obecný fakt, podložený zkoumáním, že výroba a používání pelet ze zbytkových materiálů má za

následek snížení emisí vypouštěných do ovzduší ve srovnání s použitím plantážového dřeva.

Pokud budeme torefikované pelety používat pro spalování, potenciálně se mohou emise vypouštěné do ovzduší snížit na hodnoty mezi 72 % a 82 %. Pokud budeme torefikovanou biomasu užívat přímo pro malé kotle na zemní plyn, zmírní to vypouštěné emise na 58 – 79 %. To jsou značně nižší hodnoty, než kterých dosáhneme při spalování konvenčních pelet, vzhledem k nižšímu emisnímu faktoru zemního plynu (Thrane et al., 2016).

4.6 Komerční užití

Ačkoliv existuje celosvětové úsilí o rozvoj torefakce v praxi, stále narážíme na několik podstatných ekonomických a technických problémů, které se musí vyřešit, než bude technologii možno využít v komerčním směru. I to jsou důvody, proč je komercializace suché torefakce v rané fázi. Samotný proces ještě není plně prozkoumán vědci a samotné účinky reakčních podmínek jsou stále podrobovány výzkumu. (Wannapeera a Worasuwannarak, 2012 ; Tapasvi, 2012) I přes tyto skutečnosti bylo za poměrně krátké časové období dosaženo významného pokroku a v několika dalších letech můžeme očekávat další demonstrační fázi technologie co se týče obchodního využití.(Kleinschmidt, 2011) Pro úplnou komercializaci je stále zapotřebí torefakční procesy optimalizovat tak, aby se dosáhlo splnění komerčních požadavků konečného užití a samozřejmě dosáhnout standardizace produktu na trhu. (Kleinschmidt, 2011)

Hlavním cílem operace je dosažení optimálního řízení procesu torefakce biomasy, co se týká času, procesní teploty a dalších parametrů pro zajištění optimální teplotní účinnosti a následně konzistentního výsledného produktu. V roce 2012 poukazoval Agar a Peng na neexistující vědecký konsenzus, rozhodující o hydrofobnostních charakteristikách a vlastnostech melitelnosti, vycházejíc ze současných výzkumů v komerčním měřítku (Agar,2012;Peng,2012). Tyto dvě vlastnosti jsou zásadní pro zpracování biomasy v pohledu konkurenceschopnosti vůči uhlí a jeho přímé substituci a nebo spalování.

Samotný příjem této technologie v komerčním prostoru bude záležet na těchto parametrech.

Stejně jako pretechnologie zpracování, tak i schopnost torefakce zpracovat širší škálu surových produktů než pouze čistě dřevní biomasu je velmi žádaná a užitečná pro zvýšení základny zdrojů biomasy a to zejména, pokud se bude týkat nízkonákladového zemědělského odpadu. Zemědělské odpady jsou problematické z důvodu snadného zapálení, mají nižší hustotu a samotná biomasa má delší vlákna, což může vést skrz nekonzistentní velikost až k nerovnoměrnému účinku pyrolýzy (Boyd, 2011; Melin,2011).

V současné době vázání při peletizaci torefikované biomasy provádíme pomocí přidané páry či horké vody. Torefikované materiály mohou vyžadovat i jiné vázací materiály, může se jednat o glycerin, či sušený destilátor, k tomuto je používána například sója či obilniny (Pirraglia,2012 ; Batidzirai,2013). Tento způsob se používá hlavně pro biomasu, jež prošla pyrolýzou při vyšší teplotě a má následně lepší výhřevnost, což v důsledku může mít vliv na udržitelnost této biomasy pohromadě. V tuto chvíli (v demonstračním laboratorním měřítku) vzhledem k úrovni produkce nemáme k dispozici dostatek torefikovaného materiálu pro testování produktu v komerčním měřítku (Jones,2012; Nordin,2012).

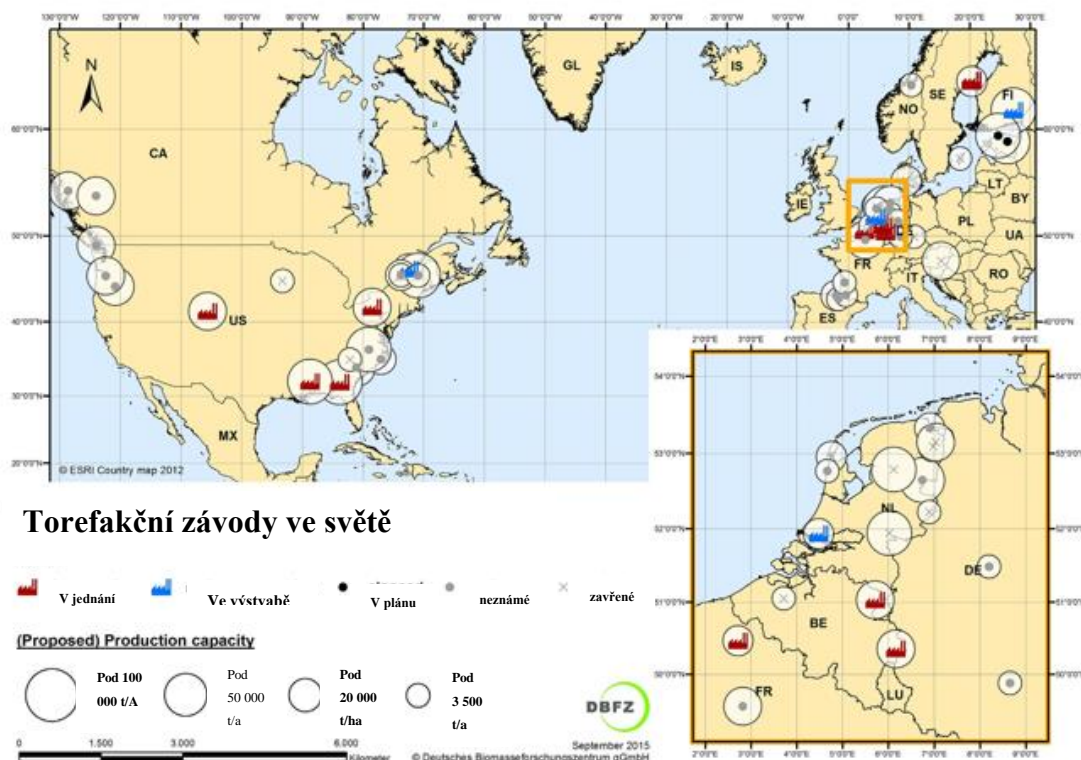
Dále, s ohledem na vysoce reaktivní prach s přítomností hořlavých plynů je třeba pracovat v bezkyslíkovém prostředí, je potřeba zajištění bezpečnostních pravidel, spojených s rizikem samovznícení, spontánního hoření a výbuchu prachu z již torefikované biomasy (Kiel,2012).

I když probíhá mnoho úsilí spojeného s identifikací optimálních podmínek pro efektivní a ekonomicky nenáročný výsledný produkt, zásadním je vliv měnících se provozních podmínek (velikost částic, doba residence, teplota procesu, rychlost ohřevu), který je stále ve výsledku nejednoznačný. Například, menší doba residence umožňuje následnou vyšší propustnost biomasy a nižší provozní náklady na samotný proces, ale vyžaduje menší velikost částic umožňující dostatečný přenos tepla. To má za následek dodatečné náklady a spotřebu energie, proto je zapotřebí nalézt kompromis a proces optimalizovat

(Meijer,2011). Také, silná torefakce může poskytnout výsledný produkt biomasy s velmi vysokou hustotou energie a to více než 23 GJ/t. nicméně, dochází ke kompromisu co se týče hustoty energie a účinnosti pyrolyzního procesu, výhod podél logistického řetězce a požadované vlastnosti v konečné konverzi energie z rostlinné biomasy. (Meijer,2011;Park a Jang,2012). Z tohoto důvodu se opět vracíme k potřebě identifikace optimálních podmínek, až způsobem „pokus-omyl“(Stelte,2011;Kiel,2011) a odpovídajícími požadavky na konečné užití (Kiel,2011).

Jak bylo zmíněno již v přechozích kapitolách, jemná pyrolýza je vhodnější při většině aplikací i přestože silná pyrolýza má výslednou vyšší výhřevnost, ale není efektivní co se týče nákladů, zároveň však jemná pyrolýza není konečným řešením co se týče zlepšení vlastností biomasy během pražení. I toto je důležitý poznatek, pro další kroky, týkající se vstupu na trh.

Je nutno zmínit, že několik firem se na rozvoj již soustředí, co se týče průmyslu. V Severní Americe se v tuto chvíli rozvíjí vývoj komercializaci mokré torefakce, jež je zpomalován vzhledem k obtížnostem jež se týkají vytváření vysokého tlaku v reaktoru. I přesto, řada akademických institucí a výzkumných agentur, pracují na zlepšení obou technologií, jak mokré tak i suché torefakce. V Holandsku je od roku 2010 demonstrační závod, jež využívá 60 000 tun biomasy ročně, jež pochází z lesních pozemků. V Belgii, společnost Green Investments dokončila výstavbu demonstrativního závodu, jež je založen na modifikované pásové sušárně s kapacitou 45 000 tun za rok. Jedná se o zpracování biomasy metodou suché torefakce. Podobné závody existují také v Americe a v Kanadě (Thran et al, 2016).



Obrázek 8 Torefikční závody ve světě (Thran et al., 2016).

Použití torefikovaného produktu v Evropě může být zvýšeno trojnásobně, pokud se jím nahradí pouhých 5% běžně užívaného uhlí. (Willen,2013) Současné odhady jsou optimistické, vzhledem k tomu, že torefikované pelety mají potenciál nahradit 50% užívaného uhlí a podobných produktů, očekává se, že využití torefikovaného dřeva se zvýší z 12 milionů tun spotřebovaných za rok 2010 na 25 milionů tun v roce 2020, pouze v západní Evropě. Toto zvýšení využívání torefikovaných pelet bude vyžadovat dovoz torefikovaný produkt z východní Evropy, Ruska a Severní Ameriky, aby byla nasycená poptávka. V roce 2012 bylo ze severní Ameriky převezeno více než 3 miliony tun pelet pro evropský trh (Willen, 2013).

Jak jsem několikrát zmiňovala, pokud má výroba a užití torefikovaných pelet dosáhnout celosvětového měřítka, normy a předpisy musí být vytvořeny tak, aby všechny vyrobené pelety splňovaly úroveň kvality pohonných hmot. Několik vývojářů v Americe a Evropské Unie výrazně investovali do vývoje suché torefakce. Pro komerční užití je velmi podstatná Kanada, jež má přibližně 969,1 milionu hektarů půdy, z čehož je 397,2 milionů hektarů tvořeno lesy. Kromě výrobků na bázi dřeva uijeme na torefakci i zemědělské

zbytky, jež zůstávají po sklizni či například odpad ze mlýnů (jeden z nejrozšířenější zdrojů pro výrobu pelet a dalších biopaliv) a také samozřejmě plodiny pěstované primárně pro produkci biomasy (Batidzirai,2013).

4.6.1 Výzkumný projekt SECTOR

Ve světovém měřítku můžeme pozorovat stále větší zájem vědecké obce o zkoumání pilotních projektů, jež se týkají torefikované biomasy a samotné vyzrálosti a potenciálu této technologie. Tímto podnětem vznikl evropský výzkumný projekt SECTOR (Výroba udržitelné energie z biomasy prostřednictvím torefakce - Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of Torrefaction), jejímž hlavním cílem je zkrácení doby pro uvedení technologie na trh. V rámci projektu bylo torefikováno 158 mg biomasy prostřednictvím různých technologií – rotační buben, pohyblivé lůžko, toroidní reaktor. Tato komparace vedla k určení optimalizace procesu a k poznání ideální kombinace užívaných metod a to prostřednictvím analýzy změny struktury a složení.) (Thran et al.,2016). Takto upravené pelety a brikety byly podrobeny zkouškám logistiky (manipulace a následné skladování), následně došlo ke zkoumání používání v malém i ve velkém měřítku. Tímto způsobem získané informace vedly k upřesnění požadavků na zlepšení, týkající se logistiky a konečného užití (trvanlivost, melitelnost, hydrofobicita, biodegradace, hustota).

S těmito výslednými daty bylo iniciováno vytvoření mezinárodních standartů (normy ISO) jako předpoklad pro globální obchodování s torefikovaným materiálem. Doprovodné ekonomické a ekologické posouzení vyplynulo v mnoho scénářů, kdy torefikovaná biomasa má lepší výsledky než tradiční tuhá biopaliva, v závislosti na surovině, její velikosti, logistiky dopravy, integraci procesu do již stávajících průmyslových odvětví a koncovém užívání. Implementace technologie do průmyslových zařízení je dalším podstatným krokem pro vývoj technologie. Rozmanitost celosvětového trhu nabízí dobré obchodní možnosti pro rozvoj (Thran et al., 2016).

Vzhledem ke stále se rozvíjející a zlepšující se technologii, je v současnosti torefakce již komerčně dostupná pro dřevní materiál biomasy. Nedřevní biomasa se sice rozvíjí také, ale je potřeba ještě dalšího zkoumání, než bude možné ji začít používat tržně. Výzkumná činnost se hlavně zaměřuje na optimalizaci technologie, přesné normování, také na

vytvoření ochranné známky a veškerá právní povolení (Wild, 2015). Vývoj je samozřejmě úzce spjatý s rostoucím trhem obnovitelných energií po celém světě (Cremers, 2015). Tento statut je podporován stanovisky Evropské unie, jež trvá na zapojení bioenergetiky jako nedílnou součástí do nízkouhlíkové ekonomiky (Verhoef, 2015). Evropská unie dokonce stanovila cíle, jež se týkají podílu obnovitelných pohonných hmot v celkové spotřebě paliv – 20% do roku 2020 a 27 do roku 2030 (Evropská komise, 2015), což samozřejmě podporuje rozvoj a zavádění torefakce do průmyslu.

Projekt pomohl identifikovat úskalí při uvedení na trh, identifikoval aktuální šance a specifikoval hranice této technologie obecně pro současný stav. Vytvořená data při zkoumání napomůžou pro budoucí výzkum. V tuto chvíli specifikovali kvalitativní parametry torefikovaného materiálu a připravuje se větší standardizace. Hlavním úkolem této demonstrace v průmyslovém měřítku je vytvoření strategie na trhu, jež mohou sloužit jako strategie pro realizaci dalších průmyslových závodů.

Než se bude moct produkt dostat ke koncovému zákazníkovi, je potřeba vyřešit několik překážek. Primárně se jedná o relativně nízkou cenu CO₂. Přestože se Evropská Unie snaží zvýšit tržní cenu emisních povolenek, stále se nejedná o nástroj, jež by skutečně CO₂ omezil. Při absenci cenové parity s uhlím je také důležité, aby země zahájili další způsoby podpory pro spoluspalování nebo úplnou konverzi. Tento krok by mohl vést k výraznému růstu využití technologie. Za příklad můžeme uvést Velkou Británii, Nizozemsko a Belgie.

Také je potřeba brát potaz země mimo Evropskou Unii. Pro země, jež teprve začal zájem o využití biomasy (Asie, Jižní Afrika) by se mohla začít využívat torefakční technologie mnohem snadněji, jelikož by se zde dal přeskočit krok přestavby závodů na spoluspalování, naopak by se investovalo do závodů, jež budou se spoluspalovacím procesem počítat od začátku.

Poslední a neméně podstatná překážka, je obava z investice. Tuto obavu by mohly zmírnit vlády, jež by mohly pomoci při zajišťování financování skrz bezregresivní financování. Závody na výrobu a závody, jež by pak následně produkty zpracovávali pro svoje fungování, by mohly vznikat ve stejnou dobu a jednalo by se o optimální stav.

Vývoj bude požadovat i nadále zvláštní pozornost. Vzhledem k tomu, že více než polovina nákladů na torefakční proces pochází ze vstupních surovin, je podstatné, aby se výzkum zaměřoval na snížení nákladů na suroviny a rozvoj udržitelnosti a efektivní nakládání s biomasou. Normy výrobku a případné normy udržitelnosti jsou podstatné pro usnadnění dalšího obchodu, stejně jako k vytváření vhodných koncových přístrojů pro samotné spalování torefikované biomasy.

Závěrem SECTORU je tvrzení, že pro úspěšnou realizaci je důležité nejen technické vylepšení, ale i soustředění na politiku vývoje, s ohledem na různé odchylky v kvalitě a v cenách.

4.7 Závěr

Vzhledem k vyčerpatelnosti fosilních paliv a s ohledem na udržitelnost životního prostředí, je využití biomasy pro energetické účely výborná alternativa. Pelety, ať už torefikované či klasické mají velký pozitivní přínos při spalování – dochází k uvolňování pouze takového množství CO₂, kolik ho biomasa sama spotřebuje v průběhu svého růstu. Tato vlastnost se podílí na omezování vzniku skleníkových plynů.

U torefikované biomasy z velké části převládají pozitiva nad negativy. Nesmíme však zapomínat na to, že produkce a následné spalování torefikovaného produktu v tuto chvíli ještě není ošetřené normami, což samozřejmě není ideální a brání této technologii ve větší rozvoji, který se významně urychlí, až technologie ve větším měřítku pronikne do komerčního prostoru.

Otázkou u této technologie je ovšem, zda je v pořádku výrazně podporovat dovoz a tím zvyšovat uhlíkovou stopu. Jak bylo uvedeno v projektu SECTOR, pro západní Evropu by

bylo potřeba dovážet suroviny z východní Evropy a dalších zemí, aby byla v budoucnu nasycená poptávka, pokud mají být naplněny cíle EU ohledně navýšení využití torefikované biomasy v roce 2020.

5 Reference

- Agar, D., & Wihersaari, M. 2012. Bio-coal, torrefied lignocellulosic resources—Key properties for its use in co-firing with fossil coal—Their status. *biomass and bioenergy*, 44, 107-111.
- Acharjee, T. C., Coronella, C. J., & Vasquez, V. R. 2011. Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 102(7), 4849-4854.
- Acharya, B., Dutta, A., & Minaret, J. 2015. Review on comparative study of dry and wet torrefaction. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 12, 26-37.
- Acharya, B., Sule, I., & Dutta, A. 2012. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2(4), 349-369.
- Bach, Q. V., Tran, K. Q., Khalil, R. A., Skreiberg, Ø., & Seisenbaeva, G. 2013. Comparative assessment of wet torrefaction. *Energy & Fuels*, 27(11), 6743-6753.
- Basu, P. 2013. *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Academic press.
- Bergman, P. C., Boersma, A. R., Kiel, J. H., Prins, M. J., Ptasinski, K. J., & Janssen, F. J. J. G. 2005. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass.
- Boyd, T., de Vries, D., Kempthorne, H., Wearing, J., & Wolff, I. 2011. Mass & energy balance for torrefied pellet production. In *Proceedings of UBC Biomass Pelletization Workshop* (Vol. 18).
- Ciolkosz, D., & Wallace, R. 2011. A review of torrefaction for bioenergy feedstock production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(3), 317-329.
- Cremers M., Koppejan J., Middelkamp J., Witkamp J., Sokhansanj S., Melin S., et al.. 2015 Status overview of torrefaction technologies. A review of the commercialisation status of biomass torrefaction, in: IEA Bioenergy.
- Dai, J., Sokhansanj, S., Grace, J. R., Bi, X., Lim, C. J., & Melin, S. 2008. Overview and some issues related to co-firing biomass and coal. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 86(3), 367-386.
- Deng, J., Wang, G. J., Kuang, J. H., Zhang, Y. L., & Luo, Y. H. 2009. Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(2), 331-337.
- Englisch, M. 2011. Fundamentals and basic principles of torrefaction. In *Proc. of the internat. Workshop "Development of torrefaction technologies and impacts on global bioenergy use and international bioenergy trade*.
- Eseltine, D., Thanapal, S. S., Annamalai, K., & Ranjan, D. 2013. Torrefaction of woody biomass (Juniper and Mesquite) using inert and non-inert gases. *Fuel*, 113, 379-388.
- European Commission, 2030 Energy Strategy, Energy. 2015. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy/2030-energy-strategy> [accessed 30.07.15].
- Felfli, F. F., Luengo, C. A., Suárez, J. A., & Beatón, P. A. 2005. Wood briquette torrefaction. *Energy for Sustainable Development*, 9(3), 19-22.

- Funke, A., & Ziegler, F. 2010. Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(2), 160-177.
- Hinrichs, R., & Kleinbach, M. 2006. *Energy: Its use and the environment*. Nelson Education.
- Chen, W. H., & Kuo, P. C. 2010. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy*, 35(6), 2580-2586.
- Chen, W. H., Hsu, H. C., Lu, K. M., Lee, W. J., & Lin, T. C. 2011. Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. *Energy*, 36(5), 3012-3021.
- Ibbett, R., Gaddipati, S., Davies, S., Hill, S., & Tucker, G. 2011. The mechanisms of hydrothermal deconstruction of lignocellulose: new insights from thermal-analytical and complementary studies. *Bioresource technology*, 102(19), 9272-9278.
- Jones, J. M., Bridgeman, T. G., Darvell, L. I., Gudka, B., Saddawi, A., & Williams, A. 2012. Combustion properties of torrefied willow compared with bituminous coals. *Fuel Processing Technology*, 101, 1-9.
- Kiel J, Zwart R, Verhoeff F. 2012. Torrefaction by ECN. *International Energy Agency Bioenergy*.
- Kiel, J. 2011. Prospects of torrefaction to optimize bioenergy value chains. In *Proceedings of the Energy Delta Convention (Vol. 22)*.
- Kiel, J. 2011. Torrefaction for upgrading biomass into commodity fuel; European developments. In *Presentation at the European pellet conference. Wels, Austria*.
- Kleinschmidt, C. P. 2011. Overview of international developments in torrefaction. In *Torrefaction Workshop*.
- Kleinschmidt, C. P. 2011. Overview of international developments in torrefaction. In *Torrefaction Workshop*.
- M. Wild M.. 2015 Torrefied Biomass: the Perfect CO2 Neutral Coal Substitute Is Maturing, VGB PowerTech, p. 72-75.
- Marcus Y.. 1999. Transport properties of hot liquid and supercritical water and their relationship to the hydrogen bonding. *Fluid Phase Equilibria*, 164: 131-42.
- Meijer, R. 2011. Overview of European torrefaction landscape. In *Proceedings of the EPRI Biomass Torrefaction Workshop* (pp. 13-14).
- Melin, S. 2011. Torrefied wood: A new emerging energy carrier. *Wood Pellets Association of Canada. Presented to: Clean Coal Power Coalition CCPC*. ([http://www.pellet.org/linked/2011-03-09%20ccpc%20presentation%20\(2\).pdf](http://www.pellet.org/linked/2011-03-09%20ccpc%20presentation%20(2).pdf)).
- Montaño, C. D., Pels, J. R., Fryda, L. E., & Zwart, R. W. R. 2012. Evaluation of torrefied bamboo for sustainable bioenergy production. In *9th World Bamboo Congress, World Bamboo Organization, Antwerpen* (pp. 809-818).
- Müller-Stöver, D., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Shalatet, S. G. S., Henriksen, U., & Haugaard-Nielsen, H. 2012. Soil application of ash produced by low-temperature

fluidized bed gasification: effects on soil nutrient dynamics and crop response. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94(2-3), 193-207.

Nordin A. 2012. The dawn of torrefaction BE-sustainablethe magazine of bioenergy and the bioeconomy; p. 2-3.

Park, S. W., Jang, C. H., Baek, K. R., & Yang, J. K. 2012. Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: evaluation of fuel characteristics of the products. *Energy*, 45(1), 676-685.

Peng, J. H., Bi, H. T., Sokhansanj, S., & Lim, J. C. 2012. A study of particle size effect on biomass torrefaction and densification. *Energy & Fuels*, 26(6), 3826-3839.

Phanphanich, M., & Mani, S. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource technology*, 102(2), 1246-1253.

Pirraglia, A., Gonzales, R., Saloni, D., Wright, J., & Denig, J. 2011. Fuel properties and suitability of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus macarthurii* for torrefied wood and pellets. *BioResources*, 7(1), 0217-0235.

Pohořelý, M., Jeremiáš, M., Kameníková, P., Skoblia, S., Svoboda, K., & Punčochář, M. 2012. Zplyňování biomasy. *Chem. Listy*, 106, 264-274.

Ratte, J., Fardet, E., Mateos, D., & Héry, J. S. 2011. Mathematical modelling of a continuous biomass torrefaction reactor: TORSPYD™ column. *biomass and bioenergy*, 35(8), 3481-3495.

Sadaka, S., & Negi, S. 2009. Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28(3), 427-434.

Sarvaramini, A., Assima, G. P., & Larachi, F. 2013. Dry torrefaction of biomass–Torrefied products and torrefaction kinetics using the distributed activation energy model. *Chemical engineering journal*, 229, 498-507.

Searcy, E., Hess, J. R., Tumuluru, J., Ovard, L., Muth, D. J., Trømborg, E., ... & Hoefnagels, R. 2014. Optimization of biomass transport and logistics. In *International Bioenergy Trade* (pp. 103-123). Springer Netherlands.

Stelte, W., Dahl, J., Nielsen, N. P. K., & Hansen, H. O. 2012. Densification concepts for torrefied biomass. *International Energy Agency Bioenergy*.

Stupavský V.. 2012 Available at <http://oze.tzb-info.cz/peletky/8655-vyroba-super-pelet-metodou-torrefakce> : Accessed 2.4.2016

Sun, Y. J., Jiang, J. C., Zhao, S. H., Hu, Y. M., & Zheng, Z. F. 2012. Review of torrefaction reactor technology. In *Advanced materials research* (Vol. 347, pp. 1149-1155).

Svoboda, K., Pohořelý, M., Hartman, M., & Martinec, J. 2009. Pretreatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification. *Fuel Processing Technology*, 90(5), 629-635.

Tapasvi, D., Khalil, R., Skreiberg, Ø., Tran, K. Q., & Grønli, M. 2012. Torrefaction of Norwegian birch and spruce: an experimental study using macro-TGA. *Energy & Fuels*, 26(8), 5232-5240.

Thrän, D., Witt, J., Schaubach, K., Kiel, J., Carbo, M., Maier, J., ... & Schipfer, F. 2016. Moving torrefaction towards market introduction–Technical improvements and

economic-environmental assessment along the overall torrefaction supply chain through the SECTOR project. *Biomass and Bioenergy*.

Tsamba, A. J., Yang, W., & Blasiak, W. 2006. Pyrolysis characteristics and global kinetics of coconut and cashew nut shells. *Fuel Processing Technology*, 87(6), 523-530.

Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Wright, C. T., & Boardman, R. D. 2010. *Biomass torrefaction process review and moving bed torrefaction system model development* (No. INL/EXT-10-19569). Idaho National Laboratory (INL).

Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Wright, C. T., & Boardman, R. D. 2010. *Biomass torrefaction process review and moving bed torrefaction system model development* (No. INL/EXT-10-19569). Idaho National Laboratory (INL).

Uslu, A., Faaij, A. P., & Bergman, P. C. 2008. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 33(8), 1206-1223.

Van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasinski, K. J. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and bioenergy*, 35(9), 3748-3762.

Vasquez, V. R., & Coronella, C. J. 2009. A simple model for vapor-moisture equilibrium in biomass substrates. *AIChE journal*, 55(6), 1595-1603.

Verhoef P., Bioenergy in the European Context, BioBoost and SECTOR Policy Workshop, Brussels. 2015. Available at: https://sector-project.eu/fileadmin/downloads/workshop/Bioenergy_in_EUropean_context_final.pdf [accessed 15.01.16].

Verhoeff, F., Pels, J. R., Boersma, A. R., Zwart, R. W. R., & Kiel, J. H. A. 2011. ECN torrefaction technology heading for demonstration. In *19th European Biomass Conference and Exhibition* (pp. 6-10).

Wang, G., Luo, Y., Deng, J., Kuang, J., & Zhang, Y. 2011. Pretreatment of biomass by torrefaction. *Chinese Science Bulletin*, 56(14), 1442-1448.

Wannapeera, J., & Worasuwanarak, N. 2012. Upgrading of woody biomass by torrefaction under pressure. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 96, 173-180

Willen, C., Jukola, P., Järvinen, T., Sipilä, K., Verhoeff, F., & Kiel, J. 2013. Wood torrefaction–pilot tests and utilisation prospects. *Espoo, VTT technology report*, 122, 73.

Xiao, L. P., Shi, Z. J., Xu, F., & Sun, R. C. 2012. Hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 118, 619-623.

Yan, W., Acharjee, T. C., Coronella, C. J., & Vásquez, V. R. 2009. Thermal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28(3), 435-440.

Yan, W., Acharjee, T. C., Coronella, C. J., & Vásquez, V. R. 2009. Thermal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28(3), 435-440.

Yan, W., Hastings, J. T., Acharjee, T. C., Coronella, C. J., & Vásquez, V. R. 2010. Mass and energy balances of wet torrefaction of lignocellulosic biomass†. *Energy & Fuels*, 24(9), 4738-4742.

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Zheng, C., Lee, D. H., & Liang, D. T. 2006. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. *Energy & Fuels*, 20(1), 388-393.

Eyer A. 2013. Method and system for the torrefaction of lignocellulosic material.: USA:
The United States Patent and Trademark Office. US 20130075244 A1

Dhungana, A., Basu, P., & Dutta, A. (2012). Effects of reactor design on the
torrefaction of biomass. *Journal of Energy Resources Technology*, 134(4), 041801.

6 Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení reaktorů (Dhungana, 2012)	12
Obrázek 2 Schéma reaktoru (Eyer, 2013)	14
Obrázek 3 Změna teplot v závislosti na zónách. (Tumuluru, 2010).....	15
Obrázek 4 Změna obsahu v závislosti na fázích. (Tumuluru, 2010).....	16
Obrázek 5 Diagram suché torefakce.(Yan et al.,2010).....	17
Obrázek 7 Distribuce TGA v pyrolýzním procesu.. (Chen, 2010).....	22
Obrázek 8 Co2 emise z torefikovaných materiálů. (Thrane et al.,, 2016).....	28
Obrázek 9 Torefakční závody ve světě (Thran et al., 2016).....	32

7 Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání některých vlastností paliv (torefikované a dřevěné pelety, uhlí) (Stupavský, 2012).....	9
Tabulka 2 Profily T50 a R50 čtyř testovaných biomas v pyrolýzním procesu..(Chen, 2010).....	23

