



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLIV TOREFAKCE NA STRUKTURU BIOMASY

TORREFACTION INFLUENCE ON BIOMASS STRUCTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dalibor Kojecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Patrik Elbl

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Dalibor Kojecký**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Patrik Elbl**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv torefakce na strukturu biomasy □

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Torefakce je jednou z méně tradičních technologií přeměny biomasy, která zlepšuje energetické vlastnosti paliva. Práce bude věnována vlastnostem paliv vznikajících torefakcí a parametrům ovlivňující proces torefakce, zejména vlivu teploty a doby zdržení. Další náplní práce bude zhodnocení technologií používaných pro proces torefakce.

Cíle bakalářské práce:

- Základní vlastnosti biomasových paliv.
- Energetické zhodnocení biomasy pomocí torefakce.
- Faktory ovlivňující proces torefakce.
- Popis technologií torefakce.

Seznam doporučené literatury:

BASU, Prabir. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Third edition. London: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-812992-0.

ŠOOŠ, Lubomír, Milan KOLEJÁK a František URBAN. Biomasa - obnovitelný zdroj energie. Bratislava: VERT, 2012. Edícia vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-970957-3-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřená na vlastnosti paliv vznikajících torefakcí. Úvodní kapitola je věnována obecné rešerši o biomase. Tato část slouží k seznámení se s biomasou a způsoby jejího tepelného zpracování. Další kapitoly se věnují procesu torefakce. Konkrétně popisu této technologie a jejímu vlivu na použitou biomasu. V poslední kapitole je zaznamenáno, jak jednotlivé parametry ovlivňují torefikační proces.

Klíčová slova

Torefakce, pyrolýza, biomasa, hrubý rozbor, teplota reakce, doba zdržení

ABSTRACT

This bachelor's thesis is focused on the properties of fuels arising from torrefaction. The opening chapter is dedicated to general research into biomass. This chapter is made for familiarisation with biomass and types of its thermal treatment. The following chapters are dedicated to the torrefaction process. Specifically, a description of this technology and its influence on biomass. The last chapter documents how the individual parameters affect the torrefaction process.

Key words

Torrefaction, pyrolysis, biomass, proximate analysis, reaction temperature, residence time

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOJECKÝ, Dalibor. *Vliv torefakce na strukturu biomasy* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124640>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Patrik Elbl.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vliv torefakce na strukturu biomasy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne 11.6.2020

.....
Datum

Dalibor Kojecký

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Patriku Elblovi za obětavou spolupráci, ochotu při konzultacích a cenné rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 Biomasa	11
1.1 Struktura a dělení biomasy	11
1.2 Způsoby energetického využití biomasy	12
1.2.1 Spalování	13
1.2.2 Zplyňování.....	13
1.2.3 Pyrolýza	14
2 Fyzikální, chemické a biologické vlastnosti paliv.....	15
2.1 Hrubý rozbor.....	15
2.2 Vlhkost.....	16
2.3 Spalné teplo.....	17
2.4 Výhřevnost.....	17
3 Popis torefakce	18
3.1 Původ slova torefakce	20
3.2 Torefikovaná biomasa.....	21
3.2.1 Výhody torefakce	21
3.2.2 Nevýhody torefakce.....	22
3.2.3 Porovnání s dalšími druhy biopaliv	23
4 Popis technologií torefakce	24
4.1 Suchá torefakce.....	24
4.2 Mokrý torefakce.....	26
4.3 Porovnání technologií a jejich klady a zápory	27
5 Faktory ovlivňující proces torefakce	29
5.1 Teplota reakce.....	29
5.2 Doba zdržení v reaktoru.....	32
5.3 Velikost částic.....	35
ZÁVĚR.....	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	39
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	45

ÚVOD

Se snahou o minimalizaci používání neobnovitelných zdrojů energie, jako jsou například fosilní paliva, dochází k nahrazování těchto zdrojů relativně rychle obnovitelnou biomasou získávanou převážně z rostlin. Problém nastává v tom, že fosilní paliva mají relativně nízkou cenu, vysokou energetickou hustotu a velká část zařízení na tepelné zpracování jsou konstruována na využívání právě fosilních paliv. Tyto důvody mají za následek to, že fosilní paliva jsou stále nejpoužívanějším zdrojem energie a je složité tuto skutečnost změnit.

Obyčejná biomasa bohužel nedosahuje takových energetických vlastností jako například uhlí a z toho důvodu se lidstvo snaží najít různé způsoby, jak upravit biomasu, aby dosahovala co nejlepších energetických vlastností. Jednou z těchto technologií úpravy je proces s názvem torefakce. Jedná se o poměrně novou a perspektivní technologii, která se výrazně rozšiřuje až v posledních desítkách let.

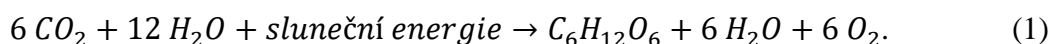
Princip torefakce spočívá ve vysoušení biomasy. Dochází k rozkladu základních strukturních látek biomasy a uvolňování kondenzovatelných a nekondenzovatelných plynů. Výsledná biomasa z toho důvodu přijde o určitou část obsažené energie, ale dojde také k výraznému poklesu její hmotnosti.

Kromě zvýšení energetické hustoty paliva dochází při torefakci i ke změně hrubého rozboru a zastoupení prvků v biomase, což má vliv na výsledné vlastnosti biomasy jako paliva. Struktura a energetické vlastnosti výsledné biomasy po torefakci jsou ovlivnitelné mnoha faktory. Mezi ty hlavní faktory, na které je tato práce zaměřena, patří teplota reakce, doba zdržení v reaktoru a velikost částic použité biomasy.

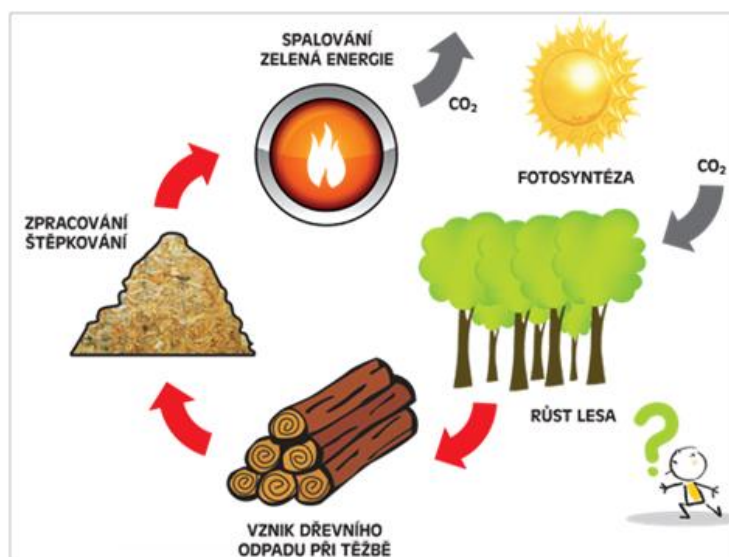
1 Biomasa

Biomasa je biologický materiál získávaný z rostlin a živočichů, který se používá k produkci jak tepla, tak i elektřiny. V současné době biomasa tvoří zhruba 10–14 % celkového zdroje veškeré energie [1].

Nejrozšířenější formou je rostlinná biomasa. Rostliny v sobě ukládají energii ze Slunce díky procesu zvaném fotosyntéza a při spalování biomasy dochází k uvolnění této chemické energie ve formě tepla. Fotosyntéza je proces, při kterém organismy obsahující chloroplasty zachycují sluneční energii ve formě světla a přeměňují ji na chemickou energii. Tím pádem se jedná o obnovitelný zdroj energie [2]. Fotosyntéza lze zapsat následující rovnicí [3]:



Při spalování biomasy dochází k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny a další látky. Následně za přítomnosti vzduchu nastává oxidace¹, při které se uvolňuje oxid uhličitý, voda a teplo. Oxid uhličitý uvolněný při spalování však skleníkový efekt nenavyšuje, a to z důvodu, že rostliny za svého růstu odebírají z ovzduší CO_2 a při spalování ho opět vrací do ovzduší. Používání biomasy namísto fosilních paliv tím pádem výrazně přispívá k omezení emisí CO_2 [1, 4]. Výše popsany koloběh CO_2 je znázorněn na obrázku 1.



Obrázek 1: Proces využití biomasy a koloběh CO_2 [5].

1.1 Struktura a dělení biomasy

Biomasa se skládá ze základních strukturních látek buněčné stěny a malého množství dalších doprovodných složek jako například minerální látky, oleje, vosky, tuky a škroby. Základní strukturní látky buněčné stěny jsou karbohydráty a lignin. Mezi obsažené karbohydráty patří vlákna celulózy a hemicelulózy, která tvoří takzvanou kostru buněčných stěn a umožňují rostlině stát vzpřímeně bez jakékoliv vnější podpory. Lignin je hydrofobní² polymer sloužící ke spojování a zpevňování těchto vláken. Ve struktuře biomasy má největší zastoupení celulóza, tvořící 40–50 % hmoty, následovaná ligninem a hemicelulózou, kde oba polymery

¹ slučování hořlavých prvků obsažených v palivu s kyslíkem [4]

² hydrofobní charakter ligninu zabraňuje bobtnání buněčných stěn [6]

zaujímají podíl okolo 20–35 %. Relativní poměr celulózy a ligninu je důležitý faktor při určování vhodnosti energetického zpracování rostlin. Do doprovodných minerálních látek patří hlavně vápník, draslík, sodík, fosfor a hořčík. Tyto minerální látky po energetickém zpracování končí jako součást popelu nebo koksu [1, 2, 6, 7, 8].

Energetická biomasa se rozlišuje na [2, 9]:

a) biomasu odpadní:

- zbytky ze zemědělské a potravinářské výroby (sláma, odpady ze sadů a vinic, zvířecí exkrementy),
- zbytky dřeva z lesnictví a dřevařského průmyslu (kůra, větve, pařezy, kořeny, piliny),
- komunální organické odpady (kaly z odpadních vod, organický podíl tuhých komunálních odpadů),

b) biomasu záměrně pěstovanou pro energetické účely:

- obilí, brambory, cukrová řepa, cukrová třtina, olejniny, energetické dřeviny (topoly, olše, akáty a vrby).

Kromě přímého spálení biomasy ji lze přeměnit na biopaliva a bioplyny. Existuje několik druhů biopaliv, které jsme schopni zpracováním biomasy získat. Mezi ně patří [9]:

- pevná paliva: pelety, brikety, palivové dřevo, štěpka, piliny,
- kapalná paliva: metanol, etanol, oleje, pyrolýzní oleje,
- plynná paliva: dřevoplyn, bioplyn, syntézní plyn, pyrolýzní plyn.

1.2 Způsoby energetického využití biomasy

Nejrozšířenějšími způsoby energetického využití biomasy v současné době jsou [9]:

- spalování suché biomasy,
- anaerobní fermentace vlhké biomasy,
- výroba kapalných alternativních paliv z biomasy.

Tabulka 1: Způsoby využití biomasy k energetickým účelům [9].

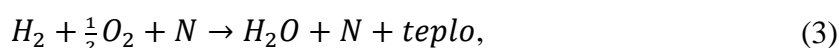
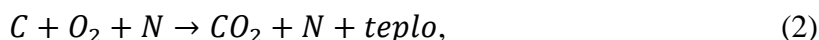
Typ konverze biomasy	Způsob konverze biomasy	Energetický výstup	Odpadní materiál nebo druhotná surovina
Termochemická konverze (suché procesy)	Spalování	Teplo vázané na nosič	Popeloviny
	Zplyňování	Generátorový plyn	Dehtový olej, uhlikaté palivo
	Pyrolýza	Pyrolýzní plyn	Dehtový olej, pevné hořlavé zbytky
Biochemická konverze (mokré procesy)	Anaerobní fermentace	Bioplyn	Fermentovaný substrát
	Aerobní fermentace	Teplo vázané na nosič	Fermentovaný substrát
Fyzikálně-chemická konverze	Esterifikace bioolejů	Metylester biooleje	Glycerin

Dále budou probrány jednotlivé způsoby termochemické konverze (viz tabulka 1).

1.2.1 Spalování

Spalování paliv je nejčastější způsob přeměny biomasy na tepelnou nebo elektrickou energii. Podstatou spalování je chemický pochod, při kterém se slučují hořlavé prvky obsažené v hořlavině paliva s kyslíkem. Jedná se o exotermickou reakci, což znamená, že se při tomto procesu uvolňuje teplo [2, 9, 10].

Ve skutečném ohništi probíhá spalování za přítomnosti vzduchu, takže kromě kyslíku nám hořlavé látky reagují i s dalšími složkami vzduchu. Spalovací reakce se vzduchem nejlépe vystihují chemické vztahy [9]:



Spalování biomasy způsobuje produkci škodlivých emisí. První emisní složkou je oxid uhelnatý, který je produktem nedokonalého spalování. Abychom zamezili jeho produkci, tak musíme mít vyšší teplotu spalování a dostatečné množství spalovacího vzduchu, při splnění daných podmínek dojde k oxidaci CO na CO₂, jehož emise jsou minimální. Dalšími emisními složkami jsou oxidy dusíku NO_x. Oxidy dusíku vznikají primárně třemi cestami. Prvním typem jsou palivové NO_x, ty vznikají oxidací dusíku vázaného v palivu. Druhým typem jsou termické oxidy dusíku, které vznikají fixací atmosférického N na O za teplot vyšších než 1100 °C. Posledním typem tvořícím nejmenší podíl z celkových emisí NO_x jsou promptní oxidy dusíku. Promptní NO_x, vznikají složitějším chemickým procesem přeměny molekulárního dusíku přes meziprodukty, jejichž vznik umožňuje přítomnost uhlovodíků ve spalovacím procesu. Emise SO₂ jsou při spalování velmi nízké díky minimálnímu množství síry v biomase [9, 11, 12, 13].

1.2.2 Zplyňování

Při zplyňování nastává sled několika procesů, při kterých postupně dochází k oxidaci uhlovodíků s vodní párou a poté k jejich redukci na hořlavé plyny, destilační produkty a minerální zbytek. Obecně řečeno zplyňováním přidáváme vodu a ubíráme uhlík, a tím pádem produkujeme plyny s vyšším H/C poměrem [2, 14].

Ke zplyňování dochází ve zplyňovači za pomoci zplyňovacího média. Nejčastěji používaným zplyňovacím médiem bývá vzduch, z důvodu nulových nákladů. Dalšími zplyňovacími médii jsou kyslík, vodní pára, CO₂ a také různé kombinace výše zmíněných médií. Proces zplyňování probíhá za vysokých teplot (tj. 800–1000 °C) a při dlouhé době zdržení. Průběh zplyňování se skládá ze čtyř částí [2, 9, 14]:

- sušení: ohřev paliva a odpaření vody vázané v palivu,
- pyrolýza: tepelný rozklad paliva na plynné složky, kondenzující páry a koks, následně tepelné štěpení par na plyn a pevný uhlík,
- oxidace: oxidace hořlavých plynů a pevného uhlíku,
- redukce: zplyňování pevného uhlíku párou nebo oxidem uhličitým.

Existuje velký počet technologií používaných u zplyňovačů, mezi ty nejběžnější patří [9, 14]:

- protiproudý zplyňovač: levný, jednoduchá konstrukce, je schopen zplyňovat i materiál s vysokou relativní vlhkostí, jeho nevýhodou je, že vytvořený plyn je nutno čistit z důvodu vyššího obsahu pyrolýzních produktů a dehtu (to je způsobeno tím, že protiproudý zplyňovač operuje za nižších teplot než ostatní zplyňovače),
- souproudý (paralelní) zplyňovač: podobný princip jako protiproudý zplyňovač, ale s tím rozdílem, že vycházející plyn obsahuje minimální množství dehtu,
- fluidní zplyňovač: výhodou jsou přizpůsobivé rozsahy reakčních rychlostí a výkonů, pro různé druhy a rozměry biomasy lze zvolit optimální hydrodynamický režim.

1.2.3 Pyrolýza

Jedná se o termochemický rozklad biomasy v prostředí se zamezeným přístupem kyslíku, vzduchu nebo jiných zplyňovacích látek (viz zplyňování výše) [15, 16].

Proces pyrolýzy spočívá v rychlém ohřevu biomasy na určitou teplotu a následném udržování na dané teplotě, dokud nedojde k produkci látek různých skupenství (nekondenzovatelných plynů, kapalných produktů a pevného biouhlí). Při pyrolýze vlivem tepla dochází k rozkladu velkých uhlovodíkových řetězců na menší a jednodušší. Pyrolýza je děj silně závislý na teplotě a z toho plyne, že vlastnosti jednotlivých produktů jsou výrazně ovlivněny pyrolýzní teplotou, která se nejčastěji pohybuje v rozmezí 300–650 °C [2].

Pyrolýzou vznikají produkty v různých skupenstvích [2, 9, 17, 18]:

- plynné: pyrolýzní plyn obsahující plynné uhlovodíky, oxid uhličitý, oxid uhelnatý a vodní páru,
- kapalné: dehet (černá viskózní kapalina složená z organických a anorganických sloučenin, převážně kondenzovaných uhlovodíků),
- pevné: biouhlí (uměle vyrobené uhlí, které je tvořeno přibližně z 85 % uhlíkem a zbytek tvoří kyslík a voda).

Podíl jednotlivých složek závisí na mnoha parametrech (doba zdržení, rychlost ohřevu, složení, vlhkost biomasy atd.), závislost na rychlosti ohřevu je vyznačen v tabulce 2.

Existuje několik různých typů pyrolýzy. Tím nejčastějším je karbonizace (probíhá za nižších teplot tj. 350–550 °C, doba zdržení je velmi dlouhá, konkrétně v řádu několika dní, rychlost ohřevu je velmi malá a výsledným produktem je dřevěné uhlí). Pod pyrolýzu spadá i proces torefakce, který je jako hlavní předmět mé bakalářské práce detailně probrán později [18, 19].

Pyrolýza se podle rychlosti ohřevu rozlišuje na pomalou pyrolýzu ($t_{\text{ohřevu}} \gg t_r$) a rychlou pyrolýzu ($t_{\text{ohřevu}} \ll t_r$), kde $t_{\text{ohřevu}}$ je čas potřebný k zahřátí paliva na pyrolýzní teplotu a t_r je charakteristický čas pyrolýzní reakce [2].

Tabulka 2: Závislost rychlosti pyrolýzní reakce na zastoupení produktů jednotlivých skupenských fází [20].

Produkty	Pomalá pyrolýza	Rychlá pyrolýza
Plynné	35 %	13 %
Kapalné	30 %	75 %
Pevné	35 %	12 %

2 Fyzikální, chemické a biologické vlastnosti paliv

2.1 Hrubý rozbor

Hrubý rozbor určuje složení tuhých paliv jako je například uhlí a biomasa. Spočívá to v tom, že stanovíme poměrný obsah hořlaviny (h), popeloviny (A^r) a vody (W^r) obsažené v palivu³, viz rovnice (5) a obrázek 2 [21]:

$$h + A^r + W^r = 100 \% \quad (5)$$

	← Surové uhlí →		
přimísená voda	voda W^r	popeloviny A^r	hořlavina h
	přítěž (balast)		prchavý podíl tuhý podíl
	bezvodé uhlí (sušina)		
spálením vznikne:			
vodní pára	tuhé zbytky – škvára (struska), popílek		spaliny

Obrázek 2: Hrubý rozbor tuhých paliv [22].

- **Voda v palivu:** voda je v palivu nežádoucí, protože snižuje jeho výhřevnost a způsobuje potíže při transportu. Přítomnost vody v palivu zvětšuje objem spalin, prodlužuje dobu zapalování paliva a zvyšuje teplotu rosného bodu [21, 23].⁴
- **Popelovina v palivu:** směs různých minerálních látek (oxidy křemíku, hliníku, železa, vápníku atd.) nacházejících se v tuhém palivu před jeho spálením. Při spalování z popeloviny pomocí chemických reakcí vzniká popel. Dalším zdrojem popele často bývají nečistoty přimíšené například během těžby nebo převozu paliva (písek, hlína, kamení). Čím menší množství popele, tím lépe – a to hned z několika důvodů. Popel totiž ztěžuje přístup kyslíku k hořlavině a zhoršuje přenos tepla v kotli [21, 23, 24].
- **Hořlavina paliva:** hořlavina je ta část paliva, která je nositelem energie uvolněné spalováním. Skládá se z aktivní složky (jedná se o prvky, jejichž oxidací se uvolňuje teplo: uhlík, vodík a síra) a pasivní složky (prvky, které nepřenáší žádnou energetickou hodnotu: kyslík a dusík) [23].⁵ Hořlavina se dělí na prchavou část a neprchavou část. Prchavá hořlavina je směs plynů uvolňujících se na začátku spalování při teplotách nad 250 °C, výrazně usnadňuje vznícování paliva a stabilizuje proces spalování. Prchavá část se s rostoucím obsahem uhlíku podstatně zmenšuje, čímž dochází ke ztěžování zapalování. Neprchavou část hořlaviny tvoří tuhý uhlík [21, 22, 25].

³ index r udává, že se jedná o hmotnostní obsahy v surovém palivu [21]

⁴ nebezpečí koroze kotlů ze strany spalin

⁵ hořlavina nemusí obsahovat všechny výše uvedené prvky, například velká část biomasových paliv neobsahuje síru [2]

2.2 Vlhkost

Měření vlhkosti biopaliv bývá často problémovou záležitostí, protože obsah vlhkosti se vlivem okolního prostředí (vzdušná vlhkost, teplota, tlak) výrazně mění v čase. Rostlinná biomasa má obvykle vysokou vlhkost, a to z toho důvodu, že rostliny přes své kořeny absorbují vlhkost z okolní půdy a ta v nich nadále zůstává. Danou vlhkost lze částečně snížit sušením biomasy. Hodnota vlhkosti se u jednotlivých druhů biomasy výrazně liší, průměrnou energetickou vlhkost biomasy naznačuje tabulka 3 [2, 21, 26, 27].

Tabulka 3: Energetická vlhkost biomasy [2].

Druh biomasy	Kukuřičné stonky	Obilná sláma	Rýžová sláma	Chlévský hnůj	Dřevěná kůra	Piliny	RDF pelety ⁶
Vlhkost v procentech	30–60	8–20	50–80	88	30–60	25–55	30

Existují dva základní druhy vlhkostí paliv [9]:

- absolutní vlhkost: používá se v dřevařství a udává poměr hmotnosti vody obsažené ve vzorku k hmotnosti vysušeného dřeva⁷:

$$W_d = \frac{H_1 - H_2}{H_2} \cdot 100 [\%], \quad (6)$$

- energetická (relativní) vlhkost: poměr váhy vody obsažené ve vzorku k hmotnosti celého vzorku:

$$W^r = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \cdot 100 [\%]. \quad (7)$$



Obrázek 3: RDF pelety [28].

⁶ pelety vyrobené z komunálního odpadu, vzhled těchto pelet je pro představu zachycen na obrázku 3

⁷ hodnota absolutní vlhkosti může být větší než 100 % a to právě tehdy, pokud je hmotnost obsažené vody větší než hmotnost vysušeného vzorku

2.3 Spalné teplo

Jedná se o teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při úplné kondenzaci vodních par a ochlazení spalin na 20 °C. Velikost spalného tepla se určuje pomocí kalorimetrické tlakové nádoby rovnicí (8). S pojmem spalného tepla se lze setkat například na fakturách za plyn, kde se od roku 2001 místo výhřevnosti udává právě hodnota spalného tepla [29, 30, 31].

$$Q_s = \frac{V \cdot \Delta T}{G} \text{ [kJ/kg]} \quad (8)$$

2.4 Výhřevnost

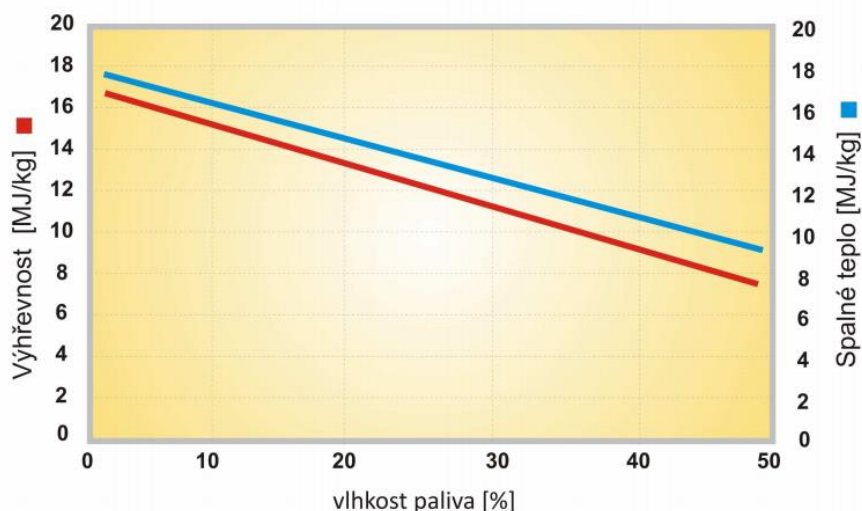
Pojem výhřevnost udává, jaké množství energie se uvolní spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C. Obecně platí, že čím vyšší výhřevnost, tím nižší je spotřeba paliva na vydanou jednotku energie [30, 32].

U výhřevnosti oproti spalnému teplu uvažujeme, že voda ve spalinách zůstane v plynné fázi a tím pádem je tato část tepla (výparné/kondenzační teplo vody) nevyužitá a uniká v plynném stavu spolu se spalinami. Přesto, že se častěji setkáváme s pojmem spalného tepla, je výhřevnost praktičtější vlastností při hodnocení paliv, protože při topení a výrobě energetické páry nemůže kondenzovat vodní pára ze spalin. Hodnota výhřevnosti roste s procentním zastoupením uhlíku a vodíku, klesá s obsahem kyslíku. Dále je hodnota výhřevnosti vysoce závislá na vlhkosti paliva (viz obrázek 4 a tabulka 4), protože při spalování paliva se spotřebuje velké množství energie na vypaření vody [2, 22, 29, 33]. Pro výpočet výhřevnosti se používají různé vzorce v závislosti na typu paliva, následující vzorec je tím nejobecnějším [21].

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot x_H) \text{ [kJ/kg]} \quad (9)$$

Tabulka 4: Průměrná výhřevnost jednotlivých druhů rostlinné biomasy [7].

Biomasa	Obsah vody [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
Listnaté dřevo	15	14,6
Jehličnaté dřevo	15	15,6
Dřevní štěpka	30	12,2
Sláma	10	15,4
Lněné stonky	10	16,9

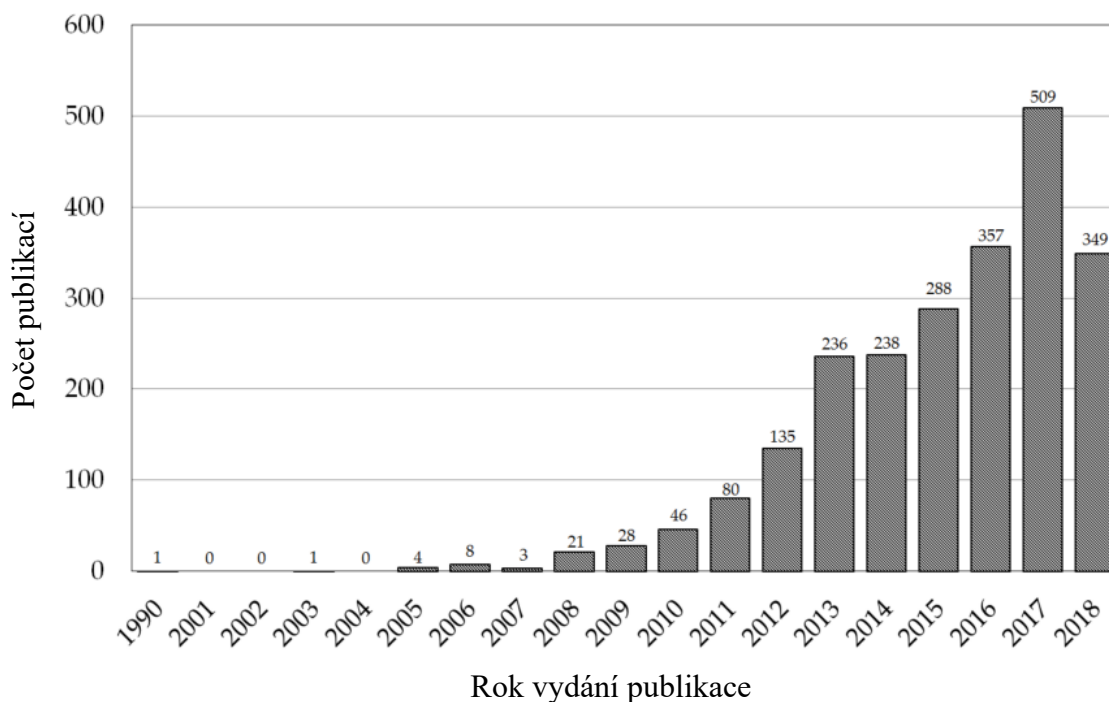


Obrázek 4: Závislost hodnoty výhřevnosti a spalného tepla dřeva na jeho vlhkosti [34].

3 Popis torefakce

Proces torefakce spočívá v pomalé pyrolýze prováděné za nízkých teplot, a to nejčastěji v teplotním rozsahu od 200 do 300 °C. Laicky řečeno se jedná o sušení/pražení. Doba zdržení u tohoto procesu je 10–60 minut a rychlost ohřevu je velmi pomalá. Nejčastěji se k torefakci využívá dřevní biomasa a výslednými produkty jsou kondenzovatelné⁸ a nekondenzovatelné⁹ plyny a specifická biomasa, která se svými vlastnostmi podobá uhlí. Tato biomasa je dále ochlazena, pomleta na požadovanou velikost (několik milimetrů) a poté za zvýšené teploty stlačena do formy pelet nebo briket. Vzniklý materiál dosahuje lepších vlastností pro následné spalování nebo zplyňování, než jakých by bylo dosaženo u klasické biomasy [35, 36, 37, 38].

Počátky procesu torefakce se datují už koncem devatenáctého století, ale jak značí graf na obrázku 5, tak se lidé o tento proces začali více zajímat až ve dvacátém prvním století, kdy počet vydaných publikací na téma torefakce začal exponenciálně růst. Lze tedy říct, že se jedná o novou a perspektivní technologii, se kterou se v České republice teprve začínáme seznamovat [37, 39, 40].



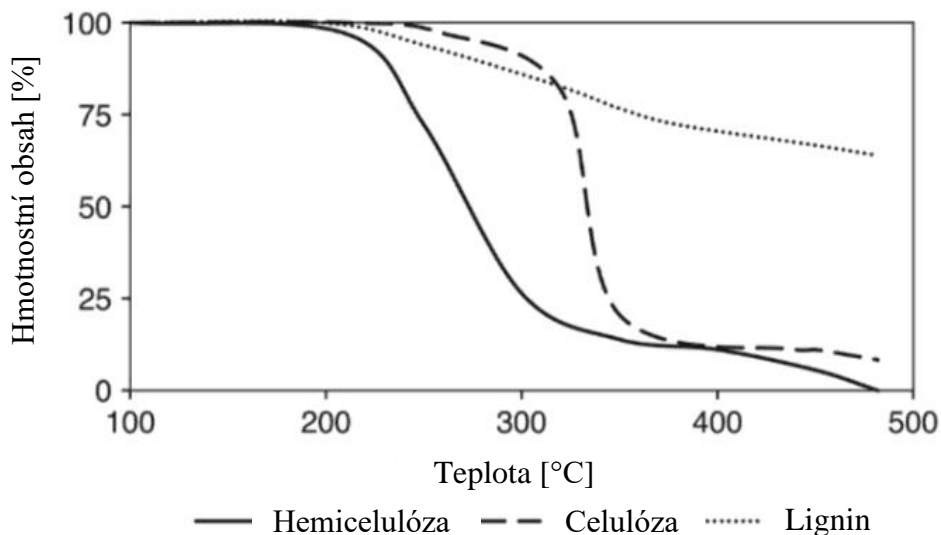
Obrázek 5: Počet vydaných publikací zahrnujících proces torefakce v jednotlivých letech [39].

Hlavním mechanismem torefakce je rozklad základních strukturních látek biomasy. Převážně se jedná o rozklad složek hemicelulózy, ke kterému dochází za teplot 200–300 °C, což odpovídá rozsahu teplot, ve kterém je prováděna torefakce. Rozklad hemicelulózy způsobuje značný pokles v celkové hmotnosti biomasy. K výraznějšímu rozkladu ligninu a celulózy dochází až při vyšších teplotách, kterých proces torefakce nedosahuje. Z toho plyne, že se torefakcí získá biomasa s nižší hmotností, ale s vyšším procentuálním zastoupením ligninu a

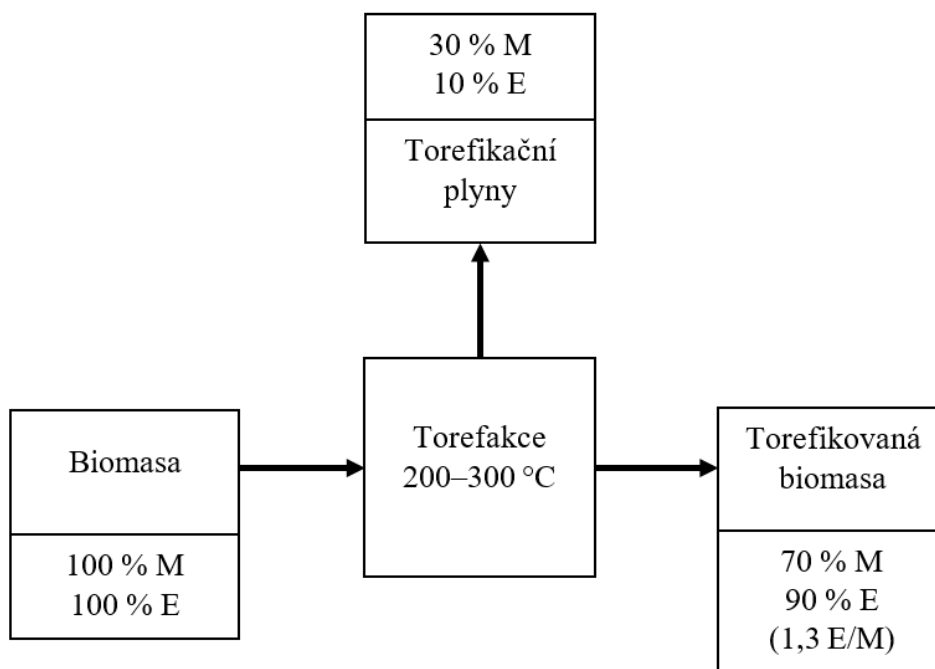
⁸ mezi kondenzovatelné látky uvolňující se při torefakci patří voda a organické sloučeniny jako například kyselina octová, methanol a furfural [19, 65]

⁹ jedná se převážně o CO₂, CO a malého množství CH₄ [19, 48]

celulózy [2, 19]. Pokles hmotností jednotlivých složek biomasy v závislosti na teplotě je znázorněn na obrázku 6. Na obrázku 7 je zachycena změna hmotnosti a obsažené energie v biomase po dokončení torefakčního procesu.



Obrázek 6: Závislost teploty na hmotnostním obsahu základních strukturních látek biomasy [19].



Obrázek 7: Změna hmotnosti a obsažené energie v biomase před a po torefakci. E značí energii a M značí hmotnost. Vyznačené 1,3 E/M znamená, že torefikovaná biomasa má o 30 % větší energetickou hustotu než neupravená biomasa [11, 41].

Změna struktury ovlivní spoustu vlastností biomasy. Výsledná procentuální koncentrace ligninu se zvýší přibližně o 10–15 % a působením vyšší teploty¹⁰ dochází také k jeho zjemňování [19]. Tím dojde k narušení pevných struktur a lepšímu shlukování a nabalování drobných částí torefikovaného materiálu, čímž se sníží tlak a teplota potřebné k peletizaci. Pokles obsahu hemicelulózy způsobí vyšší křehkost a drobivost materiálu. Tohle všechno zásadně ovlivní melitelnost a výsledná spotřeba energie na rozemletí torefikované biomasy je tím pádem nižší až o 90 % než u klasické dřevní biomasy [19, 39].

Obecně platí, že čím vyšší koncentrace ligninu, tím jsou výsledné pelety kvalitnější. Peletizace torefikované biomasy sice nezvýší její energetickou hustotu vztaženou k jednotce hmotnosti, ale za to znatelně zvýší energetickou hustotu vztaženou k jednotce objemu. Z těchto poznání vyplývá skutečnost, že peletizace torefikované biomasy je energeticky výhodnější než torefakce zpeletizované biomasy [2]. Na druhou stranu některá experimentální data udávají, že peletizace torefikovaného materiálu může být, vzhledem k jeho křehké povaze, komplikovanější než peletizace netorefikované biomasy. Tento nedostatek by ale měl jít vyřešit tím, že by procesy torefakce a peletizace probíhali současně [19]. Výsledný vzhled torefikované biomasy po peletizaci je ukázán na obrázku 8.



Obrázek 8: Torefikované pelety [42].

3.1 Původ slova torefakce

Odhaduje se, že pojem torefakce byl poprvé použit okolo roku 1600 a jako většina internacionálních slov má svůj původ v latině [43]. Anglické slovo „torrefaction“ vzniklo z francouzského výrazu „torréfier“, který znamená pražit. Tento výraz vychází z latinského pojmu „torrefacere“, což je spojení dvou slov „torrēre“ = pražit/vysušit a „facere“ = dělat/provádět [44].

Slovo torefakce není v českém jazyce pořádně zažitě a z toho důvodu se lze setkat i s pojmenováními torefikace nebo torifikace. Existují i poangličtěné verze se dvěma písmeny r po sobě, a to jsou slova torrefakce a torrefikace. Jako přídavné jméno od toho slova se v českých textech nejčastěji vyskytuje termín „torrefikovaná“. Norma ČSN EN ISO 16559 uvádí počestěný výraz „torefikovaná“ a přesně tento termín budu i já používat ve své bakalářské práci [45].

¹⁰ ke zjemňování ligninu začíná docházet od teploty 130 °C [2]

3.2 Torefikovaná biomasa

Procesem torefakce vzniká pražená biomasa podobající se uhlí. Vzhledem k tomu, že torefakce zažívá svůj rozvoj až v posledních letech a jedná se o něco poměrně nového, tak je velmi důležité si ujasnit, v čem se torefikovaná biomasa liší od obyčejné dřevní biomasy a také, jak si obstojí ve srovnání s klasickým uhlím [37, 39].

Dřevní biomasa je nejběžnější forma biopaliva. Bohužel značné množství jejích vlastností je při následném energetickém zpracování překážkou a tím pádem má oproti ostatním biopalivům větší počet nedostatků. Mezi hlavní nevýhody neupravené dřevní biomasy patří [2, 19, 39, 41]:

- nízká energetická hustota (nízká výhřevnost),
- vysoká vlhkost,
- dřevní biomasa je až příliš objemná, a z toho důvodu její skladování a transport nejsou příliš ekonomicky výhodné,
- nehomogenní¹¹,
- vznik velkého množství kouře při spalování,
- hydrofilní¹²,
- je obtížné ji rozemlít,
- vyšší obsah anorganických látek (obsahujících zejména vápník, křemík a draslík),
- vyšší náchylnost popeloviny ke spékání a usazování se.

3.2.1 Výhody torefakce

Torefakce většinu výše zmíněných nevýhod dřevní biomasy do určité míry eliminuje. Torefakcí vznikne homogenní palivo v pevném skupenství s vyšším energetickým obsahem a nižší vlhkostí. Toto palivo je tedy pro následné spalování nebo zplyňování vhodnější než obyčejná biomasa. Mezi hlavní výhody torefakce patří následující fakta [2, 39, 46]:

- výsledně zpracovaná biomasa je hydrofobní,
- torefikované pelety mají až o 30 % větší energetickou hustotu než obyčejné dřevěné pelety,
- snižuje O/C a H/C poměr biomasy¹³,
- následné hoření torefikovaného paliva je čistější a ve vzniklém dýmu se nachází menší podíl kyseliny,
- snižuje energii potřebnou ke zredukování velikosti paliva a tím usnadňuje jeho následnou úpravu a manipulaci.

Nejzásadnější výhoda torefikované biomasy oproti tradiční biomase je větší hustota energie neboli množství energie na jednotku objemu a s tím také související vyšší výhřevnost. Větší energetická hustota také nepřímo snižuje počet emisí CO₂. Potřeba menšího výsledného počtu pelet znamená redukci celkové dopravy od výrobce k zákazníkovi [47].

¹¹ velká škála tvarů a velikostí biomasy (příliš velký rozdíl ve tvaru a velikosti biomasy způsobuje nerovnoměrné spalování biomasy a řadu problémů při skladování a manipulaci s biomasou) [19]

¹² hydrofilie je schopnost látek vázat vodu [39]

¹³ při torefakci dochází k větším ztrátám kyslíku a vodíku, než jaké jsou ztráty uhlíku (nastává zvýšení podílu tuhého uhlíku, který je poté možno oxidací využít k uvolnění tepla, čímž zlepšuje kvalitu energetického zpracování a zvyšuje výhřevnost) [48, 66]

U torefikované biomasy dochází k eliminaci spousty problémů vznikajících při následném spalování. Mezi ně patří hlavně spékání¹⁴, zanášení a chlorová koroze. Torefakcí biomasy nastane také zlepšení řady fyzikálních vlastností, jako je tvarová stálost, hydrofobní charakter a homogenita (vlastnosti se na celém objemu nemění, tuhle změnu vlastností způsobovaly například stopy pryskyřic a olejů) [37].

Díky hydrofobnímu charakteru nedělá děšť torefikované biomase téměř žádný problém a tím umožňuje její skladování a manipulaci i ve venkovním prostoru. Hydrofobní charakter se také výrazně podílí na snížení hmotnosti výsledné biomasy, a to kvůli tomu, že u klasické hydrofilní biomasy tvoří voda značný podíl hmotnosti. Torefikovaný materiál má navíc i vysokou odolnost vůči hnilobným procesům a díky tomu je možná mnohem delší doba uložení před energetickým zpracováním bez toho, aby docházelo k degradaci paliva [37, 39, 47].

Torefakce umožňuje zpracování různých druhů pevné biomasy a jejich následnou peletizaci do společného produktu s homogenními fyzikálními a chemickými vlastnostmi [41]. Vzniklé palivo se při následném tepelném zpracování chová velmi podobně jako uhlí. Francouzská strojírenská firma Thermya dokonce uvádí informace o tom, že v testech torefikovaná biomasa dopadla lépe než uhlí. Z výsledků testů vyplývá, že torefikované palivo vzplane dříve než uhlí, pomáhá urychlovat spalování, produkuje nižší obsah popeloviny a zlepšuje celkovou energetickou výkonnost kotle [37].

3.2.2 Nevýhody torefakce

I přes spoustu výhod s sebou torefakce přináší řadu komplikací nastávajících při jednotlivých procesech a následných nedokonalostech vzniklého paliva. Jednou z nevýhod torefakce je skutečnost, že při tomto procesu ztrácí biomasa přibližně 10 % své energie. Tato energie je akumulována v prchavé hořlavině, uvolňující se při torefakci. Pokud bude proces torefakce probíhat za teplot výrazně vyšších než 300 °C, tak dojde k uvolnění příliš velkého množství prchavých látek hořlaviny a tím k výraznému snížení výhřevnosti vzniklého paliva [48].

Další problém nastává, pokud je ve vstupní surovině velký rozdíl ve velikosti částic anebo nesouměrné rozložení obsažené vody. V tom případě dochází k nerovnoměrné karbonizaci a nejmenší kousky se přemění v dřevěné uhlí, zatímco ve větších částech nenastane kompletní torefakce. S velikostí částic souvisí ještě další problém a tím je zanesení a ucpání přítoku plynu příliš malými částicemi biomasy [37].

Značným problémem je i velká závislost na teplotě reakce. Každý typ dřeva má svou ideální teplotu hoření a kdyby došlo k zahřívání při výrazně odlišných teplotách, tak by se zvýšil počet emisí a energetický výnos by byl nižší než obvykle [47]. Velká závislost průběhu torefakce na teplotě a době zdržení s sebou přináší i problém s komplikovanou obsluhou torefikačního zařízení. V souvislosti s vlhkostí, velikostí částic a podílem prchavých látek je nutno správně nastavit hodnoty teplot a doby zdržení, jinak by nemusela torefakce správně proběhnout a mohlo by dokonce dojít i k výbuchu a požáru [37].

¹⁴ problém spékání popele spočívá v tom, že při spalování biomasy v kotli dochází ke vzniku skelných a skelně krystalických nápeků [67]

3.2.3 Porovnání s dalšími druhy biopaliv

Výsledné porovnání hlavních vlastností pro energetické zpracování u nejpoužívanějších typů biopaliv je zpracováno v tabulce 5. Je důležité si uvědomit, že vypsaná paliva mají značnou řadu zástupců a existuje velké množství faktorů ovlivňujících aktuální stav jednotlivých paliv, tím pádem vypsané hodnoty nemusí vždy odpovídat skutečnosti, ale jedná se spíše o nějaké obecné porovnání.

Tabulka 5: Srovnání vlastností různých typů biopaliv [48, 49].

Biomasa	Dřevěná polena	Dřevěné pelety	Torefikované pelety	Dřevěné uhlí	Uhlí
Výhřevnost [MJ/kg]	9–12	15–16	20–24	30–32	23–28
Vlhkost [%]	30–45	7–10	1–5	1–5	10–15
Prchavý podíl [%]	70–75	70–75	55–65	10–12	15–30
Tuhý uhlík [%]	20–25	20–25	28–35	85–87	50–55
Hustota [kg/m ³]	200–250	550–750	750–850	200	800–850
Hydrofobní	Ne	Ne	Ano	Ano	Ano
Melitelnost	Špatná	Špatná	Dobrá	Dobrá	Dobrá

Z tabulky 5 vyplývá, že torefikovaný materiál se nejvíce podobá uhlí. Konkrétně má vlastnosti podobné přechodnému typu mezi hnědým a černým uhlí. Uvolněním plynů a vody při torefakci vznikne palivo s nižší vlhkostí a nižším obsahem prchavých látek. Tím dojde ke zvýšení tuhého podílu uhlíku, který zlepšuje výhřevnost paliva¹⁵.

¹⁵ jedná se o téměř stoprocentní koks, který má výhřevnost až 30 MJ/kg [30, 56]

4 Popis technologií torefakce

4.1 Suchá torefakce

Jedná se o běžnější typ torefakce a obecně se slovem torefakce myslí právě suchá torefakce, stejně to platí i pro tuto práci. Tento typ procesu probíhá v suchém inertním prostředí, kde dochází k zahřátí předem vysušené biomasy pomocí horkého inertního plynu. Použitá inertní atmosféra se skládá převážně z dusíku a nedochází v ní k nežádoucím chemickým reakcím. Absence kyslíku potlačuje spalovací proces a umožňuje tepelný rozklad biomasy [50, 51].

První částí procesu je nejprve nadrcení biomasy na menší části, aby docházelo k lepšímu šíření tepla. Poté nastává několik zahřívacích fází, které se dělí následovně [19, 39].

- Předehřátí biomasy na teplotu vypařování: první část procesu, biomasa je ohřáta z pokojové teploty na teplotu 100 °C, aby mohlo probíhat sušení. Energie potřebná pro předehřátí je dána vztahem:

$$Q_{pře} = \frac{M_f \cdot C_{pn} \cdot (100 - T_0)}{h_{u,pře}} [kJ], \quad (10)$$

kde M_f je hmotnost nevysušené biomasy, C_{pn} je tepelná kapacita nevysušené biomasy, T_0 je počáteční teplota a $h_{u,pře}$ je energetická účinnost procesu předehřátí biomasy.

- Sušení biomasy: dochází k vypařování většiny obsažené vody. Jedná se o energeticky nejnáročnější část torefikačního procesu, a to zejména pro biomasu obsahující velké množství vlhkosti. Probíhá převážně za konstantní teploty o hodnotě 100–105 °C. Množství energie potřebné pro sušení lze zapsat pomocí vztahu:

$$Q_{suš} = \frac{r \cdot M_f \cdot W^r}{h_{u,suš}} [kJ], \quad (11)$$

kde r je výparné teplo vody (přibližně 2260 kJ/kg), M_f je hmotnost nevysušené biomasy, W^r je relativní vlhkost biomasy a $h_{u,suš}$ je energetická účinnost sušení biomasy.

- Ohřátí biomasy na teplotu torefakce: po vysušení biomasy je potřeba ohřát biomasu na teplotu okolo 200 °C, protože při nižších teplotách ještě nedochází k rozkladu biomasy. Při této fázi dochází k vypaření zbylé vázané vody v biomase. Potřebná energie pro danou fázi procesu je určena vztahem:

$$Q_{ohř} = \frac{M_f \cdot (1 - W^r) \cdot C_{pv} \cdot (T_{tor} - 100)}{h_{u,ohř}} [kJ], \quad (12)$$

kde M_f je hmotnost nevysušené biomasy, W^r je relativní vlhkost biomasy, C_{pv} je tepelná kapacita vysušené biomasy, T_{tor} je teplota torefakce a $h_{u,ohř}$ je energetická účinnost této fáze procesu.

- Torefakce: probíhá mezi teplotami 200–300 °C a dochází k uvolňování a rozkladu látek v biomase. Torefakce musí proběhnout v předem určeném časovém úseku tak, abychom získali požadované vlastnosti výsledné biomasy. Tomuto časovému úseku se říká doba zdržení. Vzorec pro energii potřebnou pro vykonání této fáze procesu je:

$$Q_{tor} = H_{nev} + M_f \cdot (1 - W^r) \cdot X_t [kJ], \quad (13)$$

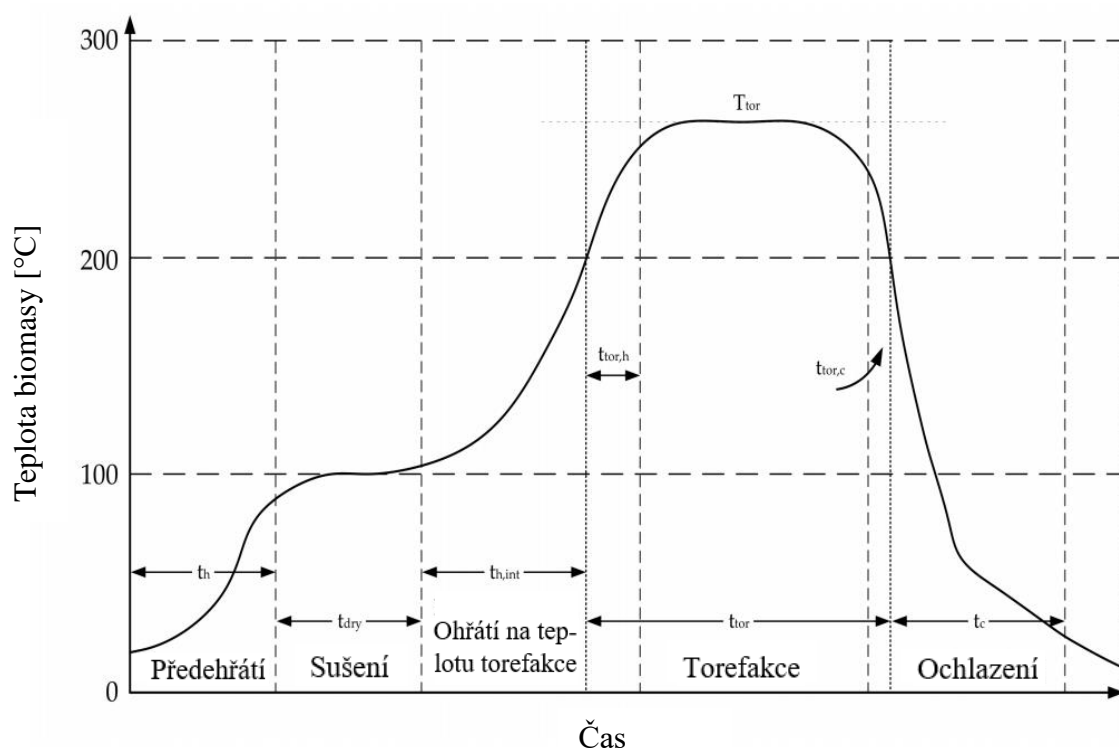
kde H_{nev} je množství nevyužitého tepla uniklého do atmosféry, M_f je hmotnost nevysušené biomasy, W^r je relativní vlhkost biomasy a X_t je množství tepla absorbovaného během torefakce.

- Ochlazení: torefikovaná biomasa je chlazená na původní pokojovou teplotu. Výsledné produkty jsou vysoce hořlavé, a z toho důvodu si musíme dát pozor, aby byla biomasa dostatečně ochlazená, než přijde do kontaktu se vzduchem, jinak by mohlo dojít k jejímu vzplanutí. Množství energie získané při ochlazení udává vzorec:

$$Q_{ochl} = M_f \cdot (1 - W^r) \cdot Y_m \cdot C_{pt} \cdot (T_{tor} - T_p) [kJ], \quad (14)$$

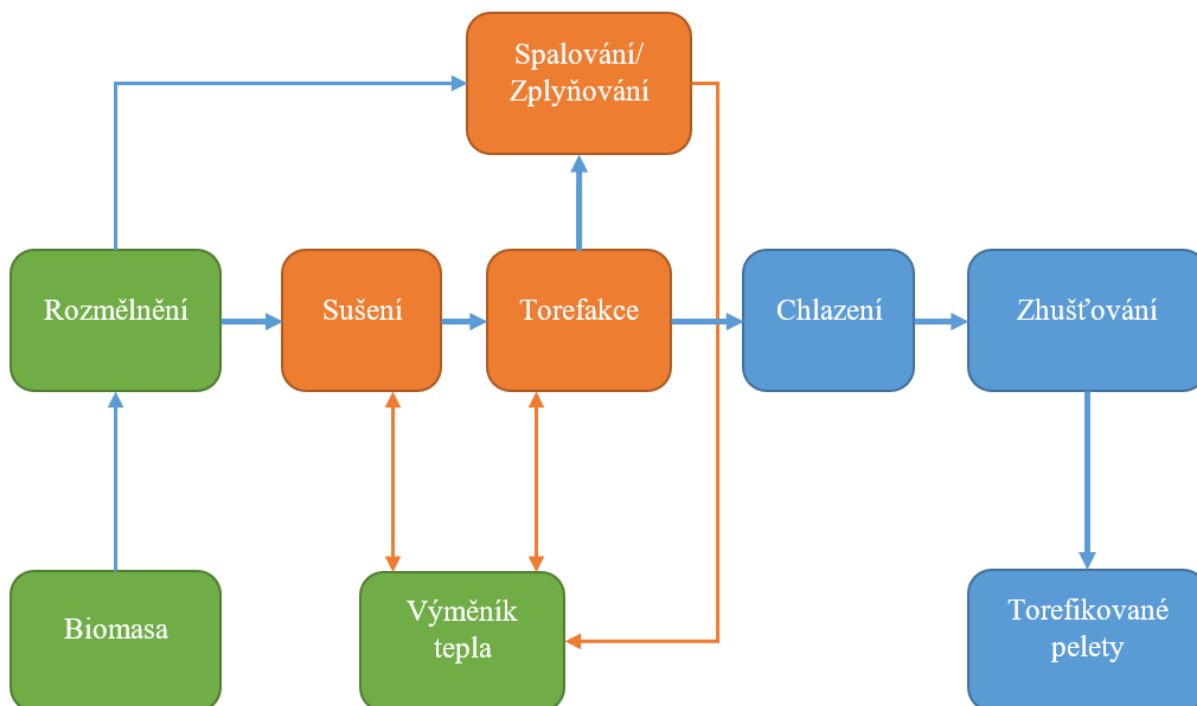
kde M_f je hmotnost nevysušené biomasy, W^r je relativní vlhkost biomasy, Y_m je hmotnostní obsah torefikované biomasy, C_{pt} je tepelná kapacita torefikované biomasy, T_{tor} je teplota torefakce a T_p je konečná teplota, na kterou je torefikovaná biomasa ochlazená.

Všechny výše zmíněné fáze jsou pro představu znázorněny v diagramu na obrázku 9.



Obrázek 9: Zahřívací fáze biomasy při torefakci. Popis jednotlivých veličin: t_h udává čas do začátku sušení, t_d je doba sušení, $t_{h,int}$ je doba ohřívání biomasy od doby sušení po začátek torefakce, t_{tor} je doba zdržení v reaktoru, $t_{tor,h}$ je doba, za kterou dojde k zahřátí z 200 °C na požadovanou teplotu torefakce T_{tor} , $t_{tor,c}$ je doba ochlazení z této teploty na 200 °C, t_c značí čas, za který se biomasa ochladí zpět na počáteční teplotu [39].

Energie obsažená v uvolněných plynech je využívána na ohřívání torefikačního procesu. V některých případech je možno generovat přebytečné teplo, které se využívá například na produkci elektřiny nebo sušicí účely [35, 51]. Velikost této energie je závislá na vlhkosti použité biomasy a z toho důvodu je při procesu sušení důležité minimalizovat obsaženou vlhkost. Aby došlo k využití tohoto odpadního tepla na ohřátí torefikačního procesu, tak dochází ke sloučení reaktorového oddílu (místo, kde dochází k samotné torefakci) se spalovací/zplyňovací komorou (místo, kde jsou zpracovávány uvolněné plyny a páry). Takovýto způsob celého torefikačního procesu je zobrazen pomocí diagramu na obrázku 10 [51].



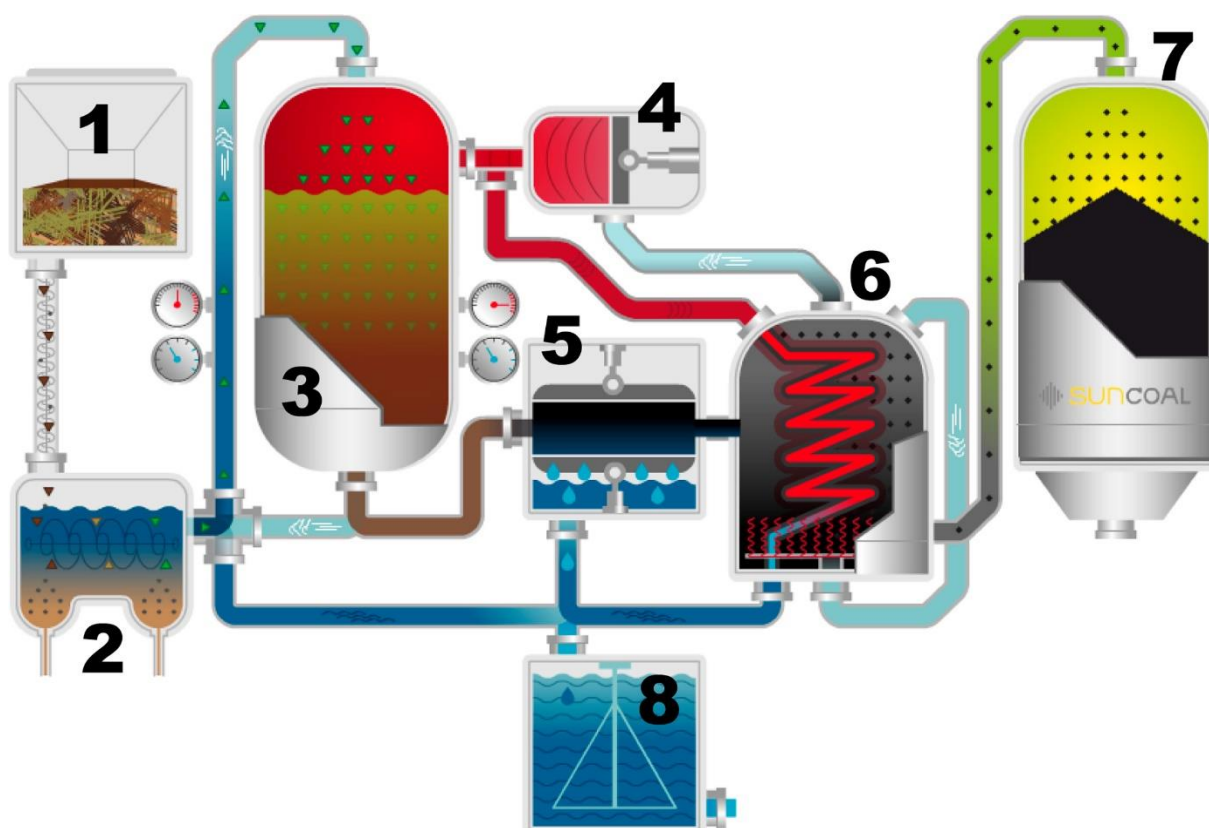
Obrázek 10: Diagram procesu suché torefakce [51].

4.2 Mokrý torefakce

Při mokré torefakci dochází k zahřívání biomasy stlačenou horkou vodou. Voda musí být po celou dobu zachována v kapalně podobě, aby nedošlo ke ztrátě energie uvolněním latentního tepla vypařování. Proto je důležité působit tlakem větším, než je tlak nasycených par [52].

Tento typ torefakce je vhodné použít pro úpravu biomasy, která obsahuje velké množství vlhkosti a není potřeba žádného předběžného vysoušení jako u suché torefakce. Je totiž požadován přibližný poměr suché biomasy a vody 1:6. Z toho důvodu je před začátkem torefakce biomasa smíchána s vodou, aby bylo dosaženo daného poměru [51].

Průběh mokré torefakce je částečně podobný jako u suché torefakce. Největší změnou v průběhu je to, že fáze sušení neprobíhá před torefakcí, ale probíhá až po torefakci jako součást chladicí fáze. Popis typického průběhu mokré torefakce je schematicky vyznačen na obrázku 11 [51, 52].



Obrázek 11: Popis procesu mokré torefakce prováděné firmou SunCoal Industries. Biomasa začíná v plnicím oddílu (1), odkud putuje do omývacího oddílu (2), kde je biomasa zbavena nečistot. Poté je v torefikačním reaktoru (3) zahřáta stlačenou horkou vodou z tepelného čerpadla (4). Výsledný produkt je následně manuálně (5) a tepelně (6) vysušen a poté je uložen do sila (7). Voda odstraněná z biomasy putuje do systému čištění odpadních vod (8) [52].

Pojmenování tohoto procesu jako „mokrý torefakce“ je lehce kontroverzním tématem, protože je možno se setkat i s pojmem „hydrotermální karbonizace“. Některé zdroje uvádí, že se jedná o to samé, zatímco jiné zdroje upozorňují na rozdíly mezi mokrou torefakcí a hydrotermální karbonizací. Udávané rozdíly jsou takové, že funkcí mokré torefakce je pouze zlepšit vlastnosti pevných paliv pro další energetické použití, kdežto při hydrotermální karbonizaci u produktu požadujeme co největší obsah uhlíku a tento produkt se kromě dalšího energetického zpracování používá i jako hnojivo. Při mokré torefakci také požadujeme co největší energetickou účinnost, a tudíž probíhá při relativně nižších teplotách než hydrotermální karbonizace [53, 54].

4.3 Porovnání technologií a jejich klady a zápory

Procesy suché a mokré torefakce mají velkou řadu odlišností. Největší rozdíly v jejich charakteristice jsou sepsány v tabulce 6. Oba procesy zlepšují výsledné energetické vlastnosti biomasy, ale každý z těchto procesů s sebou přináší vlastní klady a zápory. Suchá torefakce je v současné době o něco zaběhlejší s větším počtem provedených výzkumů [51].

Tabulka 6: Porovnání suché a mokré torefakce [53, 55].

Typ torefakce	Charakteristika
Suchá torefakce	<ul style="list-style-type: none"> • Rozsah reakčních teplot: 200–300 °C • Doba zdržení: 10–60 minut • Prostředí: inertní atmosféra • Tlak: atmosférický tlak
Mokrá torefakce	<ul style="list-style-type: none"> • Rozsah reakčních teplot: 180–260 °C • Doba zdržení: 5–240 minut • Prostředí: stlačená horká voda • Tlak: 1–25 MPa

Hlavní komplikací u suché torefakce je to, že by zpracovávaná biomasa měla mít ideálně svou vlhkost pod 10–15 %. Bohužel velká část biomasy tohoto požadavku nedosahuje a z toho důvodu je nutno provést sušení biomasy, ke kterému je nutno dodat energii. Je uváděno, že na snížení vlhkosti z 50–60 % na 10–15 % pro 1 kg biomasy je nutno dodat 3–5 MJ energie, jedná se tedy o energeticky velmi náročný a nevýhodný krok [52, 56, 57].

Z pokusů bylo zjištěno, že mokrá torefakce je velmi vhodná pro tepelnou úpravu odpadní biomasy, jako například zbytky ze zemědělské, potravinářské a dřevařské výroby. Další výhody jsou takové, že mokrá torefakce oproti suché torefakci potřebuje nižší teplotu reakce a v některých případech i kratší dobu zdržení na to, aby vyprodukovala biomasu s vyšší energetickou hustotou a lepšími hydrofobními vlastnostmi. Mokrá torefakce navíc dokáže zmenšit obsah popeloviny v biomase. Oproti tomu při suché torefakci se obsah popeloviny zvyšuje, což je nežádoucí z důvodu komplikace následného tepelného zpracování torefikované biomasy [52, 53].

Problémem mokré torefakce je častá nerovnováha v kvalitě vzniklého paliva. Mokrá torefakce vyžaduje komplexnější zařízení a torefikační reaktor musí být kvalitně zpracován, aby dokázal odolávat vysokým tlakům a korozi. Při mokré torefakci také vzniká velké množství odpadů a nečistot, které způsobují zanesení systému a jejich využití je zatím pouze ve fázi výzkumu [52, 53].

Mokrá torefakce se jeví jako perspektivnější technologie než suchá torefakce. Její výrazný rozvoj bohužel omezuje fakt, že tento proces zatím provází značné množství technických problémů, které je nejdříve potřeba rozumně vyřešit ještě předtím, než začne docházet k významnému komerčnímu využití tohoto procesu [52].

5 Faktory ovlivňující proces torefakce

Torefikační proces ovlivňuje velké množství různých faktorů jako například druh použité biomasy, rychlost ohřevu, druh reaktoru a mnoho dalších. Některé parametry ovlivňují torefakci více než jiné, a právě na ty nejdůležitější parametry se zaměřuje tato část práce. Těmito parametry jsou [55]:

- teplota reakce,
- doba zdržení v reaktoru,
- velikost částic.

Mezi teplotou a dobou zdržení je nepřímá závislost, která se dá zapsat následující nerovnicí [2].

$$\frac{T_{tor} - 200}{t_{tor,h}} < 1 \text{ } ^\circ\text{C/s} \quad (15)$$

Abychom mohli tuto rovnici použít, musí být splněna podmínka: $200 \text{ } ^\circ\text{C} < T_{tor} < 300 \text{ } ^\circ\text{C}$.
(T_{tor} ... teplota torefakce ve $^\circ\text{C}$, $t_{tor,h}$... doba ohřevu nad $200 \text{ } ^\circ\text{C}$)

5.1 Teplota reakce

Čím vyšší teplota torefakce, tím více dojde k pražení biomasy a k jejímu vysoušení a tmavnutí. Biomasa torefikovaná při $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ má světle hnědou barvu, při $250 \text{ } ^\circ\text{C}$ biomasa výrazně zhnědne a při torefakci na $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ se biomasa stává tmavě hnědou a velmi křehkou [58].

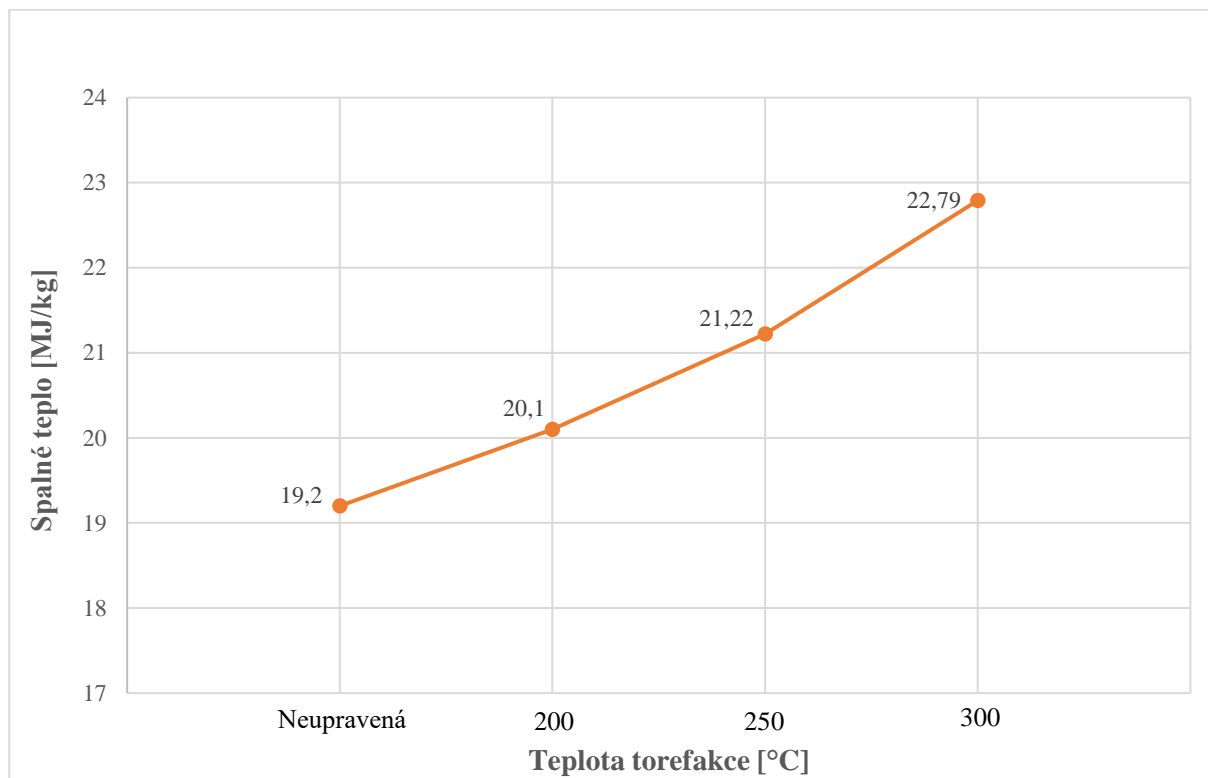
Torefakce se dá podle teploty rozlišit na tři hlavní stupně, každý z nich je charakterizován rozkladem určitých typů základních strukturních látek biomasy, tento průběh je znázorněn také na obrázku 6 [50]:

- lehká torefakce: probíhá zejména při teplotách $200\text{--}240 \text{ } ^\circ\text{C}$, při těchto teplotách dochází pouze k rozkladu hemicelulózy,
- střední torefakce: rozmezí teplot je $240\text{--}260 \text{ } ^\circ\text{C}$, začíná docházet k mírnému rozkladu celulózy a ligninu,
- silná torefakce: tento nejvyšší stupeň torefakce probíhá při teplotách $260\text{--}300 \text{ } ^\circ\text{C}$, nastává už významnější rozklad všech tří základních strukturních složek biomasy.

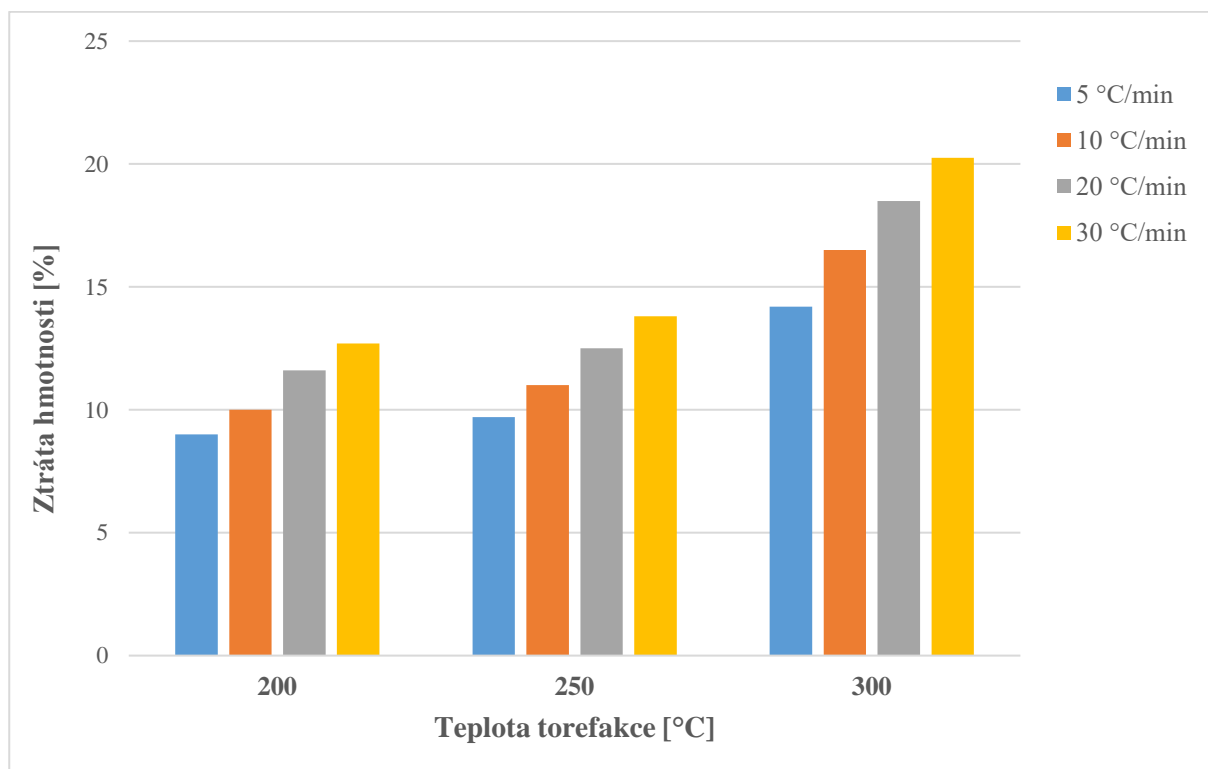
Se zvyšující se teplotou klesá především hmotnost použité biomasy. To je dáno tím, že dochází k rozkladu a vypařování látek z biomasy. Dochází také ke snížení množství obsažené energie, tento pokles není ale tak velký. Ve výsledném měřítku platí to, že čím vyšší teplota torefakce, tím větší je výsledná energetická hustota biomasy (tj. větší hodnota výhřevnosti a spalného tepla viz obrázek 12) [59].

Obrázek 13 zobrazuje závislost teploty torefakce a rychlosti ohřevu na změně celkové hmotnosti biomasy. U vzorku z cedrového dřeva bylo dosaženo největšího snížení hmotnosti (přibližně o 20 %) při největší zkoušené teplotě a rychlosti ohřevu ($300 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $30 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$). Procentuální ztráta hmotnosti byla určena pomocí vzorce [59]:

$$Y_{m,ztr} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 [\%]. \quad (16)$$

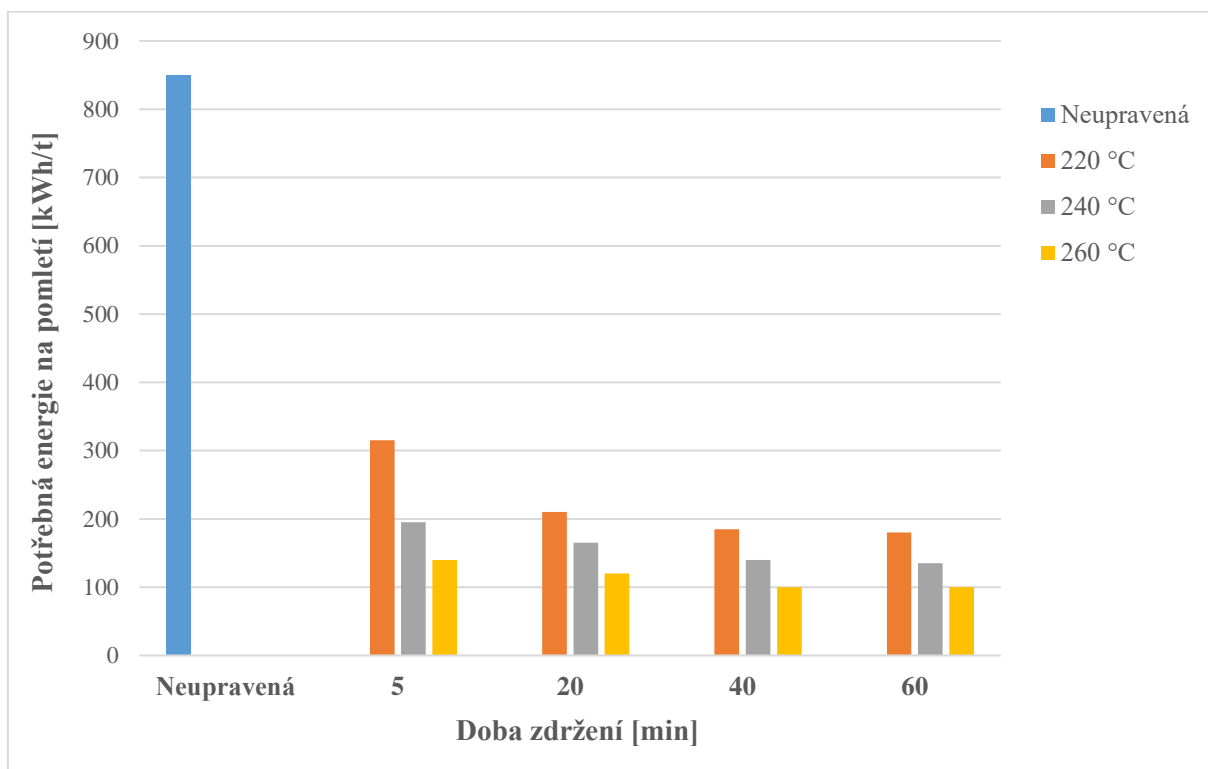


Obrázek 12: Vliv teploty reakce na velikost spalného tepla cedrového dřeva [59].



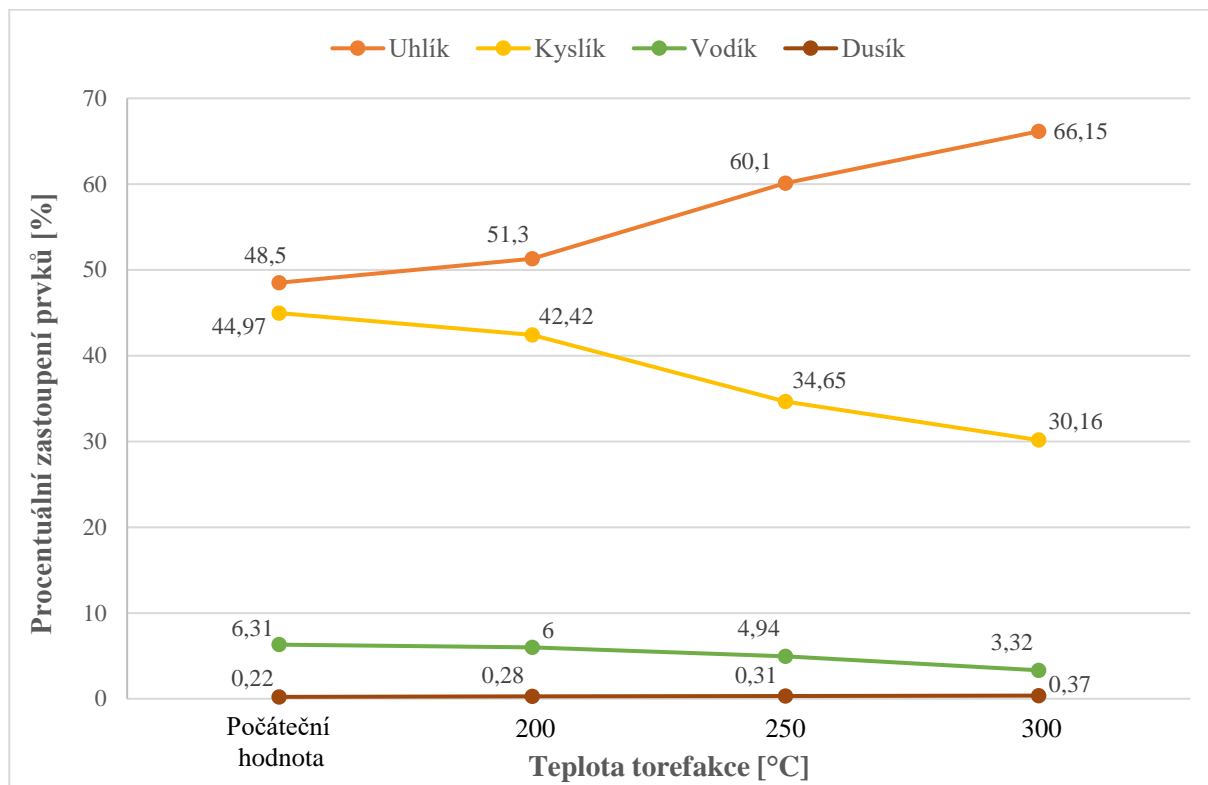
Obrázek 13: Vliv teploty reakce a rychlosti ohřevu na hmotnost cedrového dřeva [59].

Teplota reakce má ze všech faktorů největší dopad na výslednou melitelnost biomasy. Čím vyšší teplota reakce, tím nižší je potřebná energie na pomletí biomasy, a to díky tomu, že po torefakci jsou jednotlivé částice biomasy menší, křehčí a také mají více jednotnou velikost. Na obrázku 14 je znázorněn pokles této energie. Lze vidět, že na pomletí torefikované biomasy je potřeba až o 90 % méně energie než na pomletí neupravené biomasy [19, 41].



Obrázek 14: Vliv teploty reakce a doby zdržení na výslednou energii potřebnou na rozemletí torefikované biomasy z bukového dřeva [60].

Při torefikačním procesu dochází ke změně procentuálního zastoupení prvků obsažených v biomase (viz obrázek 15). Pokud je vyšší torefikační teplota, tak se zvýší procentuální obsah uhlíku, ale sníží se obsah kyslíku a vodíku, což je dáno vypařováním vody. Obsah uhlíku vzrostl přibližně o 18 %, zatímco obsah kyslíku a vodíku klesl o 15 % a 3 % z celkového procentuálního zastoupení obsažených prvků. Obsah dusíku zůstal téměř nezměněn [59].



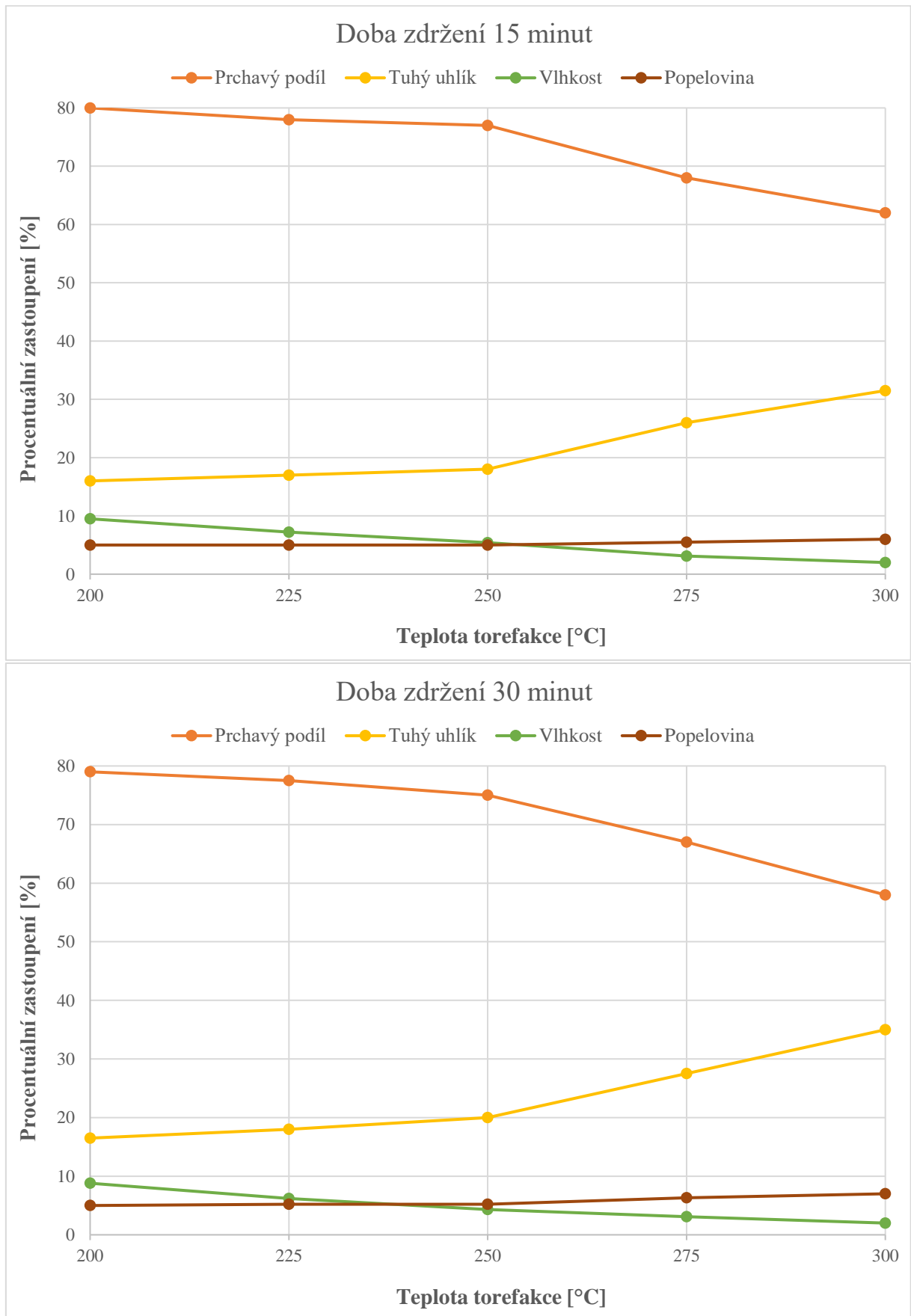
Obrázek 15: Procentuální zastoupení prvků v cedrovém dřevě při torefakci [59].

5.2 Doba zdržení v reaktoru

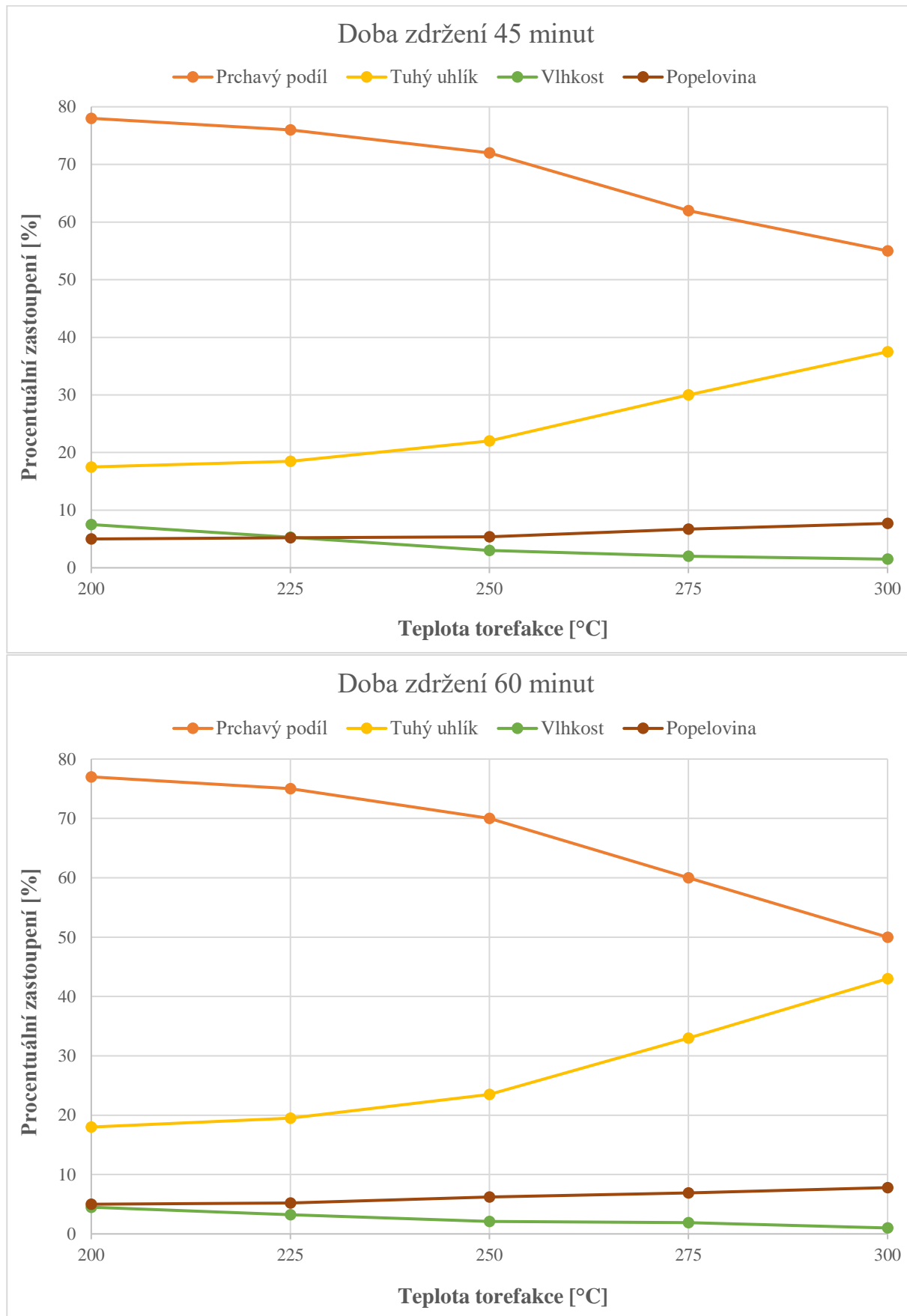
Jedná se o celkový časový úsek, který stráví biomasa v torefikačním reaktoru [61]. Doba zdržení ovlivňuje vlastnosti a strukturu biomasy podobně jako teplota reakce. To znamená, že vyšší doba zdržení bude mít na výslednou biomasu stejný vliv jako vyšší teplota reakce. Rozdíl je v tom, že její vliv oproti teplotě reakce není tak velký (teplota reakce má zhruba 1,5krát větší vliv na výsledné parametry biomasy než doba zdržení). Tento vliv na jednotlivé parametry pro bagasu z cukrové třtiny je znázorněn na obrázcích 16, 17 a 18 (použitá doba zdržení byla 15, 30, 45 a 60 minut a teplota reakce byla 200 °C, 225 °C, 250 °C, 275 °C a 300 °C) [61, 62].

Doba zdržení se nejčastěji pohybuje od 10 do 60 minut. Při vyšších teplotách reakce se větší doba zdržení moc nepoužívá, protože poté dochází k velmi malým změnám struktury biomasy. Například při vyšších teplotách torefakce dochází k nejvýraznější ztrátě hmotnosti už v prvních zhruba 15 minutách procesu. To je způsobeno tím, že při vysokých teplotách torefakce se za tuto dobu stihne vyloučit velká část prchavých látek obsažených v biomase a pak už následuje pouze malá hmotnostní ztráta [63].

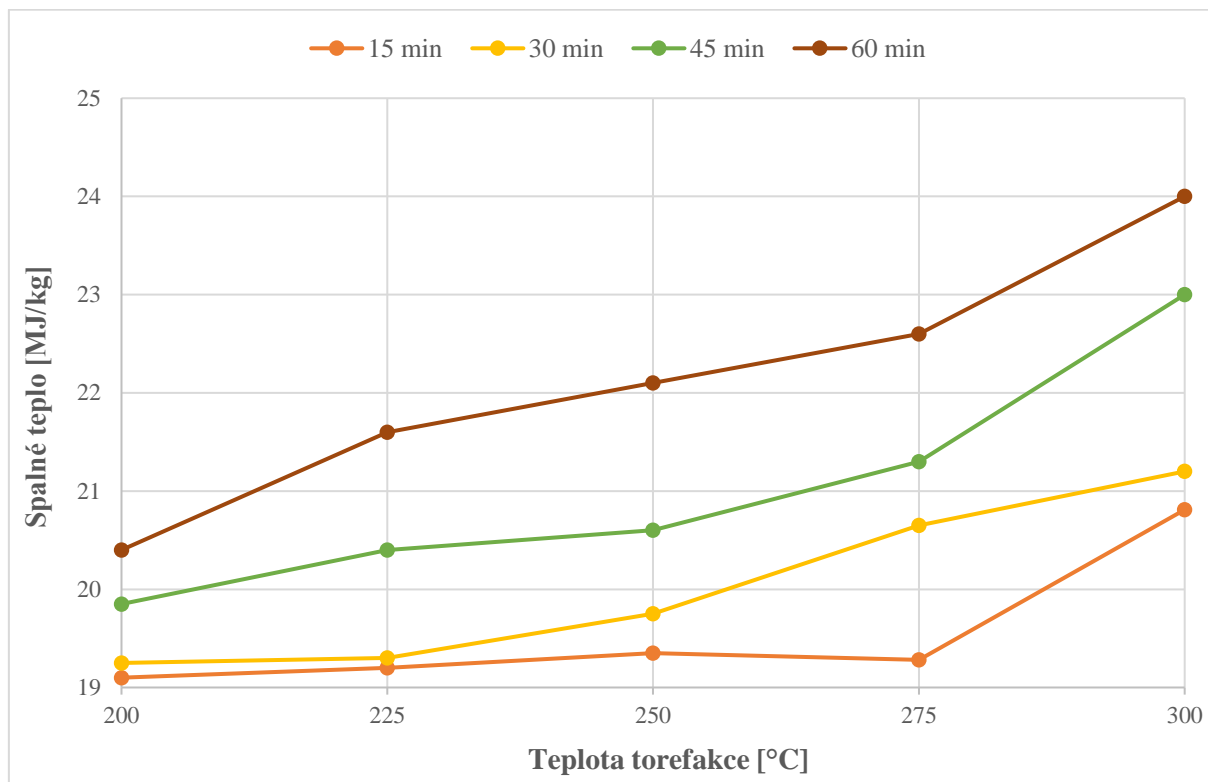
Stejně jako s vyšší dobou reakce, tak i s delší dobou zdržení, se snižuje obsah základních strukturních látek. Například u smrkové biomasy se při teplotě 310 °C a době zdržení 8 minut rozloží 80 % obsažené hemicelulózy. Oproti tomu při stejné teplotě a době zdržení dojde k rozložení zhruba 15 % obsažené celulózy. Ovšem pokud se zvýší doba zdržení na 25 minut, tak nastane prudké snížení obsahu celulózy a její obsah ve výsledné biomase bude, stejně jako u hemicelulózy, velmi malý. Výsledná biomasa bude z velké části tvořena pouze ligninem [61].



Obrázek 16: Vliv teploty a doby zdržení na hrubý rozbor bagasy z cukrové třtiny (1/2) [62].



Obrázek 17: Vliv teploty a doby zdržení na hrubý rozbor bagasy z cukrové třtiny (2/2) [62].



Obrázek 18: Vliv teploty reakce a doby zdržení na spalné teplo bagasy z cukrové třtiny [62].

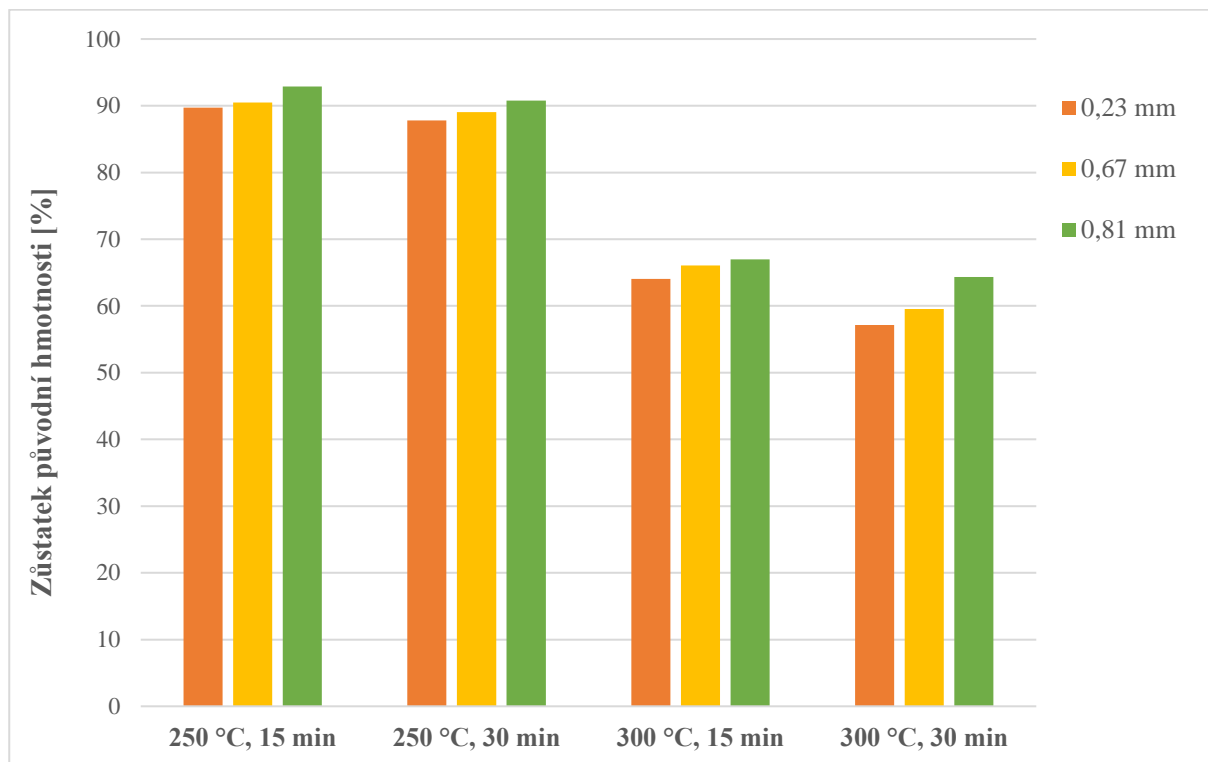
Nejvýraznější změny v hrubém rozboru biomasy a její energetické hodnotě nastaly při největší teplotě reakce a době zdržení. Tyto nejvyšší hodnoty s sebou nepřináší jenom klady, ale bohužel i zápory. Problémem větší teploty reakce a doby zdržení je vzrůstající obsah popeloviny, který je v biomase nežádoucí, protože ztěžuje následné tepelné zpracování. Další nevýhodou je fakt, že tento způsob použití nejvyšších hodnot je energeticky nejnáročnější a celkový proces trvá dlouhou dobu [62].

5.3 Velikost částic

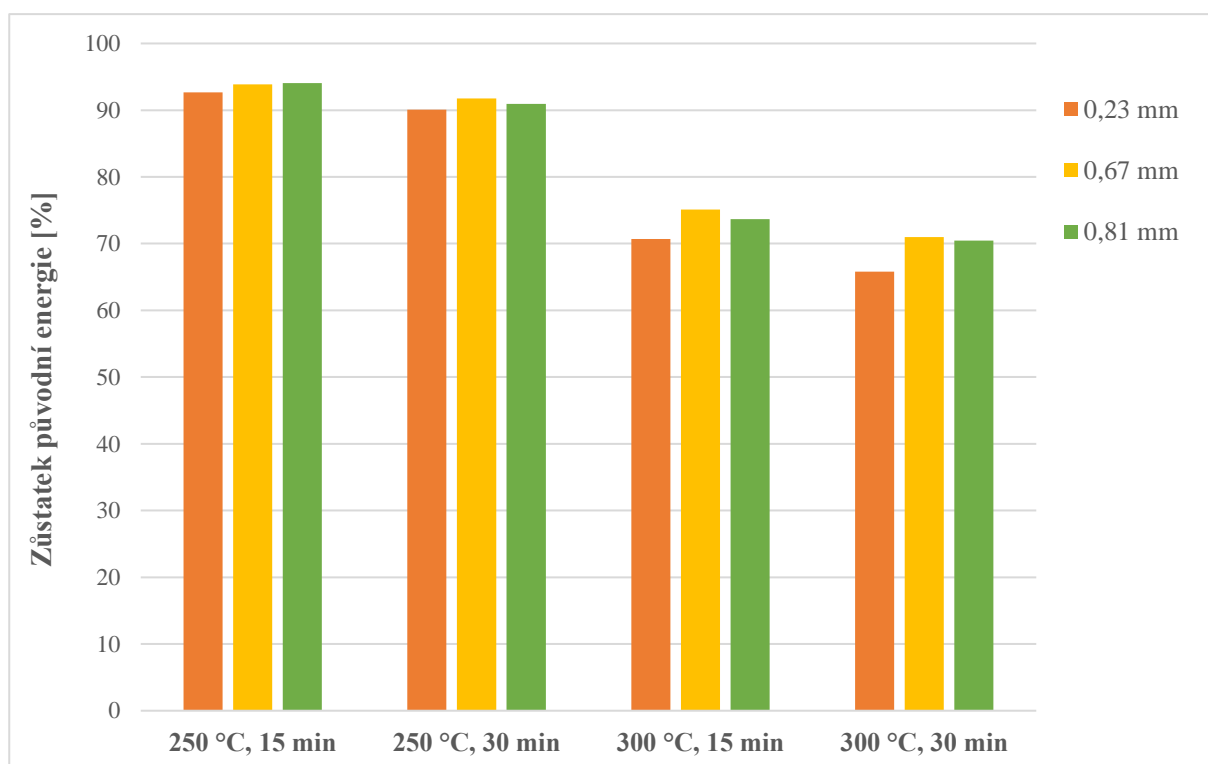
Při torefakci dochází k přenosu tepla z reaktoru na povrch biomasy a poté z povrchu biomasy do jejího středu. Malé částice mají větší rozlohu vnějšího povrchu na jednotku hmotnosti než velké částice, a tím pádem u nich dochází k lepšímu přenosu tepla a lepšímu uvolňování prchavých látek z biomasy. To znamená, že čím větší je velikost částic použité biomasy, tak tím je potřeba dodat větší množství tepla [55].

U větších částic může docházet k nerovnoměrné torefakci, což způsobí, že v různých místech částice nastane odlišný stupeň torefakce a vzniklé palivo nebude mít požadované vlastnosti. Podobný problém nastává při torefakci biomasy se značným rozdílem ve velikosti částic, kdy dochází k tomu, že každá částice dosáhne jiného stupně torefakce [50, 55].

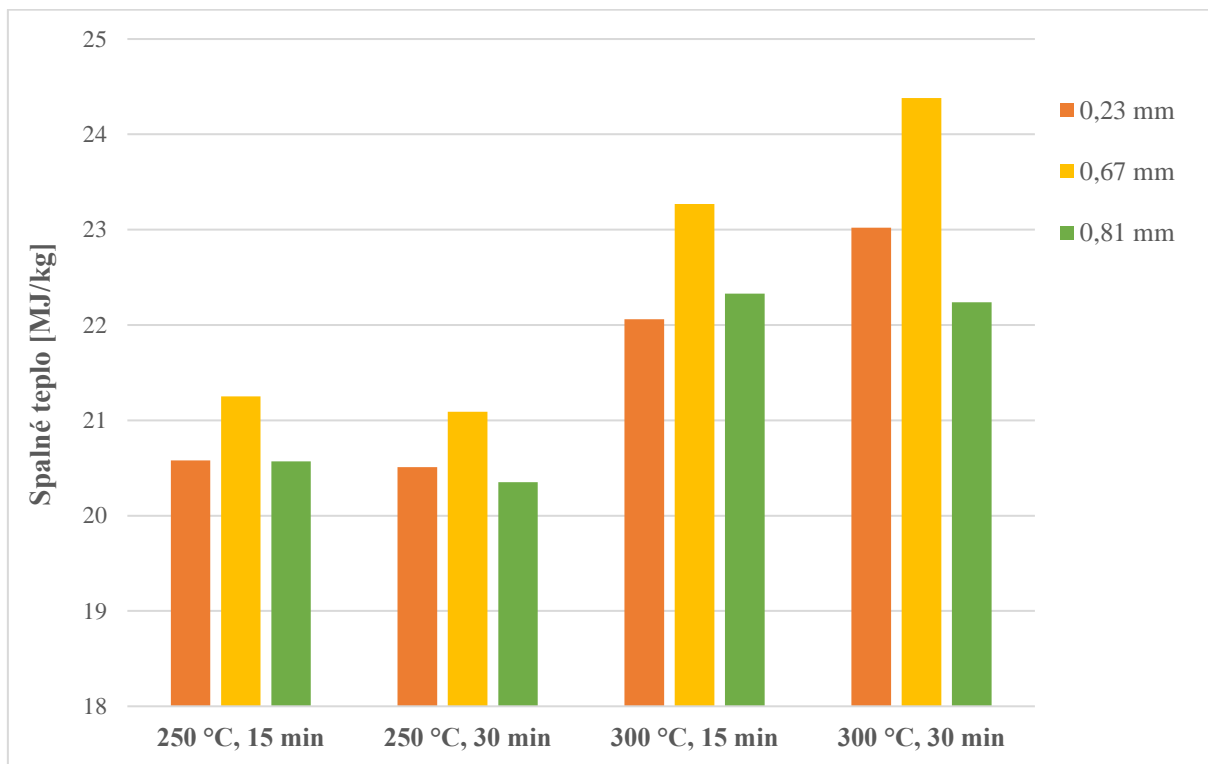
Velikost částic má vliv i na hodnotu hmotnostní a energetické ztráty paliva. Při torefakci rozměrově nejmenších částic jsou tyto ztráty největší, což dokazují obrázky 19 a 20 [55]. Z měření závislosti velikosti částic na hodnotě spalného tepla (zaznačené na obrázku 21) vychází velmi kolísavé a nejasné výsledky. Z toho lze usuzovat, že velikost částic nemá žádnou přímou závislost na výslednou hodnotu spalného tepla torefikované biomasy.



Obrázek 19: Vliv velikosti částic pilin z borovice na změnu hmotnosti při torefakci [55, 64].



Obrázek 20: Vliv velikosti částic pilin z borovice na změnu obsažené energie v biomase při torefakci [55, 64].



Obrázek 21: Vliv velikosti částic pilin z borovice na hodnotu spalného tepla torefikovaného paliva [64].

ZÁVĚR

Cílem práce bylo provedení rešerše o přeměně biomasy pomocí technologie torefakce za účelem zlepšení energetických vlastností biomasy. Práce je věnována popisu této poměrně nové technologie, parametrům ovlivňujícím tento proces a jejich vlivu na výslednou strukturu biomasy použité pro torefakci.

Mezi nejzásadnější výhody patří to, že torefakcí se získá biomasa s větší výhřevností a nižší vlhkostí. Energie potřebná na zredukování velikosti torefikovaného paliva se sníží až o 90 % a díky hydrofobnímu charakteru nedělá déšť torefikované biomase skoro žádný problém. Tím pádem jsou výrazně usnadněny podmínky pro transport a skladování torefikované biomasy. Torefikovanou biomasu lze využít jako náhradu za některé méně kvalitní druhy uhlí, například lignit. Většina typů méně kvalitního uhlí má dokonce nižší energetickou hustotu, větší vlhkost a větší obsah popeloviny než torefikovaná biomasa. Co se negativ týče, tak tím největším je nutnost správného nastavení a obsluhy torefikačního zařízení, jinak by torefakce nemusela proběhnout správně a hrozilo by nebezpečí výbuchu a požáru.

Z hlediska faktorů ovlivňujících proces torefakce, je na tom nejlépe biomasa s co největší teplotou torefakce, nejdelší dobou zdržení a nejmenší velikostí částic. Problém nastává v tom, že pro praktické využití tyto podmínky zaberou nejvíce času a energie, tudíž je důležité najít ideální balanc. Z důvodu, že teplota reakce má zhruba 1,5krát větší vliv na výslednou biomasu než doba zdržení, lze usoudit, že ve většině případů je nejvýhodnější biomasu torefikovat při vyšších teplotách a nižší době zdržení (například 15 minut při 280 °C).

Jedná se o perspektivní technologii úpravy paliva, která má před sebou velkou budoucnost. Zatím je torefakce převážně v experimentální fázi a v současnosti je potřeba udělat ještě velké množství dalších výzkumů, dořešit zmíněné nedostatky a pořádně tento proces normalizovat. Až dojde ke splnění těchto kroků, tak poté bude rozumné a výhodné přejít na plné využívání torefakce v praxi.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002, **83**(1), 37-46. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3). ISSN 0960-8524. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001183>
- [2] BASU, Prabir. *Biomass Gasification and Pyrolysis - Practical Design and Theory*. Elsevier. ISBN 978-0-12-374988-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBGPPDT0B/biomass-gasification/biomass-gasification>
- [3] Biomass explained. *U.S. Energy Information Administration* [online]. 2018 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>
- [4] VOBOŘIL, David. Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *OEnergetice*. 2017 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
- [5] Spalování biomasy. In: *ELUC* [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2071>
- [6] *Nauka o dřevě* [online]. Praha: Fakulta lesnická a dřevařská ČZU v Praze [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://www.fld.czu.cz/cs/r-6825-studium/r-8295-studenti/r-14089-vase-obory/r-14184-magisterske-studijni-obory-do-techto-oboru-jiz-neprijimame/r-7569-drevarske-inzenyrstvi>
- [7] ZÁMOSTNÝ, Petr a Ladislav Kurc. Vliv podmínek a složení suroviny na pyrolýzu dřevní hmoty. *Chemické listy* [online]. Praha: Ústav organické technologie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011 [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2011_06_458-466.pdf
- [8] GREGOROVÁ, Dagmar. Dřevo namísto oceli nebo slitin?. *Objective Source E-Learning* [online]. 2018 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: http://www.osel.cz/9872-drevo-namisto-oceli-nebo-slitin.html?typ=odpoved&id_prispevku=161870
- [9] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav Kára a Petr Jevič. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004, 286 s. ISBN 80-86534-06-5.
- [10] SKÁLA, Zdeněk. *Energetické parametry biomasy: projekt: GAČR 101/04/1278: projekt*. 1. vyd. Brno: VUT Fakulta strojního inženýrství, 2007.
- [11] ACHARYA, Bimal, Idris Sule a Animesh Dutta. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2012, **2**. DOI: 10.1007/s13399-012-0058-y.
- [12] HEMERKA, Jiří a František Hrdlička. Emise z kotelen a ochrana ovzduší (I). *TZB-info* [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT, 2004 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i>

- [13] HODBOŮ, Josef. Přepočítání emisí oxidů dusíku NO_x ze spalování zemního plynu na zvolenou jednotku. *TZB-info* [online]. 2018 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/17338-prepocet-emisi-oxidu-dusiku-nox-ze-spalovani-zemniho-plynu-na-zvolenou-jednotku>
- [14] PEER, Václav a Pavel Friedel. Zplyňování – principy a reaktory. *TZB-info* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 2016 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [15] CHOWDHURY, Zaira, Kaushik Pal, Wageeh Yehye et al., Mohamed Samer, ed. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. *IntechOpen* [online]. IntechOpen, 2017 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/pyrolysis/pyrolysis-a-sustainable-way-to-generate-energy-from-waste>
- [16] *Pyrolýzní zpracování biomasy a jiných materiálů* [online]. Brno: AF a ZF MENDELU [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/211/17221.pdf
- [17] NEEFT, John, Harrie Knoef, U. Zielke, K. Sjöström, P. Hasler, Pekka Simell, M. Dorrington a C. Greil. Tar protocol development of a standard method for the measurement of organic contaminants (tar) in biomass producer gases. *Proceedings of the 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 2000*. 2000.
- [18] Pyrolýza. *EnviroVid* [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <http://www.envirovid.eu/pyrolyza/>
- [19] BASU, Prabir. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Third edition* [online]. London: Academic Press, 2018 [cit. 2020-01-26]. ISBN 978-0-12-812992-0. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=BYM2DwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>
- [20] BRIDGWATER, Tony. Biomass Pyrolysis. *IEA Bioenergy* [online]. Aston University Bioenergy Research Group, 2007 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.ieabioenergy.com/publications/biomass-pyrolysis/>
- [21] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vydání druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM®, s.r.o. Brno, 2013.
- [22] BALÁŠ, Marek, Martin Lisý a Jiří Moskalík. Kotle a paliva. *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>
- [23] HORÁK, Jiří. Úvod do teorie spalování tuhých paliv. *TZB-info* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [24] Popeloviny. *ČEZ* [online]. [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/popeloviny.html>

- [25] HORÁK, Jiří a Petr Kubesa. O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (2). *TZB-info* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 2012 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8644-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-2>
- [26] BALÁŠ, Marek a Jiří Moskalík. Měření vlhkosti paliv. *Biom.cz* [online]. 2011 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/mereni-vlhkosti-paliv>
- [27] LYČKA, Zdeněk. Pohledem znalce: Dřevo jako garanční palivo – i vlhkost 25 % je v pořádku!. *TZB-info* [online]. 2018 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/18368-pohledem-znalce-drevo-jako-garancni-palivo-i-vlhkost-25-je-v-poradku>
- [28] RDF in Europe. In: *P&P Industries* [online]. 2018 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <http://www.pp-industries.org/2018/11/11/vitae-adipiscing-turpis-aenean-rutrum-leo-aliquet/>
- [29] *Kalorimetrie – stanovení spalného tepla a výhřevnosti tuhých paliv* [online]. Masarykova střední škola chemická [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: http://www.mssch.cz/sites/default/files/_uzivatele/valentova/Kalorimetri09.pdf
- [30] BAJEROVÁ, Jarmila. Výhřevnost zemního plynu: Jak si vede ve srovnání s ostatními palivy?. *Elektrina.cz* [online]. 2019 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/vyhrevnost-zemniho-plynu-jak-si-vede-ve-srovnani-s-ostatnimi-palivy>
- [31] Rozbor paliva. *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT* [online]. Praha [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/pro-studenty/podklady-ke-stazeni-2/>
- [32] Výhřevnost. *ČEZ* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/vyhrevnost.html>
- [33] WICHTERLE, Kamil a Ivan Koutník. *Technologie a analýza paliv* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/01_Procesni_inzenyrstvi/05_Technologie_a_analyza_paliv/Wichterle_Technologie_a_analyza_paliv.pdf
- [34] HORÁK, Jiří a Petr Kubesa. O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1). *TZB-info* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Výzkumné energetické centrum, 2012 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [35] Torrefaction. *Biomass Technology Group* [online]. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <http://www.btgworld.com/en/rtd/technologies/torrefaction>
- [36] REZAEI, Hamid. Differences Between Torrefaction & Carbonization. *Nexen Biomass* [online]. 2017 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <http://www.nexenbiomass.com/?p=601>
- [37] STUPAVSKÝ, Vladimír. Výroba „super-pelet“ metodou torrefakce. *TZB-info* [online]. Česká peleta, 2012 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/8655-vyroba-super-pelet-metodou-torrefakce>

- [38] STELTE, Wolfgang. *Torrefaction of unutilized biomass resources and characterization of torrefaction gasses* [online]. Danish Technological Institute, 2012 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/d917/97c57e6f6bc2c55b0de26a584ff4560857a7.pdf?_ga=2.5095290.879525891.1592898216-976493139.1589532374
- [39] RIBEIRO, Jorge, Radu Godina, João Matias a Leonel Nunes. Future Perspectives of Biomass Torrefaction: Review of the Current State-Of-The-Art and Research Development. *Sustainability*. 2018, **10**. DOI: 10.3390/su10072323.
- [40] NUNES, Leonel JR. *Torrefaction of Biomass for Energy Applications: From Fundamentals to Industrial Scale* [online]. Elsevier Science, 2017 [cit. 2020-03-24]. ISBN 9780128094624. Dostupné z: https://books.google.com/books?id=Kp2pDQAAQBAJ&pg=PA27&lpg=PA27&dq=hiel+offrion+coffee+torrefaction&source=bl&ots=wkFhnw95tj&sig=ACfU3U3cOHxuDI62dRwpwz5i3_R9U-blew&hl=no&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [41] LEON, Mathias a Animesh Dutta. *Pros and cons of Torrefaction of Woody Biomass* [online]. ResearchGate, 2011 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/251606418_Pro Pros_and_cons_of_Torrefaction_of_Woody_Biomass
- [42] STRAUSS, William a Laurenz Schmidt. Are Black Pellets Ready to Compete with White Pellets?. *Biomass Magazine* [online]. 2018 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://biomassmagazine.com/articles/15072/are-black-pellets-ready-to-compete-with-white-pellets>
- [43] Torrefy. *Dictionary.com* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.dictionary.com/browse/torrefaction>
- [44] Torrefied. *Collins Online Dictionary* [online]. Collins [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/torrefied>
- [45] ČSN EN ISO 16559 - Tuhá biopaliva - Terminologie, definice a popis. *Informační systém Uvádění výrobků na trh* [online]. 2015 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.nfnorm.cz/terminologicky-slovník/55963>
- [46] What is Torrefaction. *Blackwood Technology* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://www.blackwood-technology.com/technology/what-is-torrefaction/?fbclid=IwAR0XaqUTUwtwnJn-hDCmgCmY_qaDOYGivKB8n5oWe1JzdszfGcicrUgA-eY
- [47] Wood Pellets vs. Torrefied Pellets: Which is Greener?. *Ukrainian Biofuel Portal* [online]. 2015 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://pellets-wood.com/wood-pellets-vs-torrefied-pellets-which-is-green-o13675.html>
- [48] TUMULURU, Jaya, Shahab Sokhansanj, J. Hess, Christopher Wright a Richard Boardman. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology* [online]. Mary Ann Liebert, 2011 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ind.2011.7.384>
- [49] Torrefaction Benefits. *International Biomass Torrefaction Council* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://ibtc.bioenergyeurope.org/torrefaction-benefits/>

- [50] BASU, Prabir. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Second edition*. London: Academic Press, 2013. ISBN 9780123964885.
- [51] ACHARYA, Bimal, Animesh Dutta a Jamie Minaret. Review on comparative study of dry and wet torrefaction. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2015, **12**, 26-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.08.003>. ISSN 2213-1388.
Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221313881500048X>
- [52] BACH, Quang-Vu a Øyvind Skreiberg. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, **54**, 665-677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.014>. ISSN 1364-0321. Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501093X>
- [53] HE, Chao, Chunyan Tang, Chuanhao Li, Jihui Yuan, Khanh-Quang Tran, Quang-Vu Bach, Rongliang Qiu a Yanhui Yang. Wet torrefaction of biomass for high quality solid fuel production: A review: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, **91**, 259–271. DOI: [10.1016/j.rser.2018.03.097](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.097).
- [54] BACH, Quang-Vu, Khanh-Quang Tran, Roger Khalil, Øyvind Skreiberg a Gulaim Seisenbaeva. Comparative Assessment of Wet Torrefaction. *Energy & Fuels* [online]. 2013, , s. 6743-6753 [cit. 2020-04-28]. DOI: [10.1021/ef401295w](https://doi.org/10.1021/ef401295w).
- [55] NHUCHHEN, Daya Ram, Prabir Basu a Bishnu Acharya. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *IBIMA Publishing* [online]. International Journal of Renewable Energy & Biofuels, 2014 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z:
<https://ibimapublishing.com/articles/IJREB/2014/506376/>
- [56] CREMERS, Marcel, Jaap Koppejan, Jan Middelkamp, Joop Witkamp, Shahab Sokhansanj, Staffan Melin a Sebnem Madrall. Status overview of torrefaction technologies – A review of the commercialisation status of biomass torrefaction. *IEA Bioenergy* [online]. 2015 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z:
<https://www.ieabioenergy.com/publications/status-overview-of-torrefaction-technologies-a-review-of-the-commercialisation-status-of-biomass-torrefaction/>
- [57] FAGERNÄS, L., J. Brammer, C. Wilén, M. Lauer a F. Verhoeff. Drying of biomass for second generation synfuel production. *Biomass and Bioenergy*. 2010, **34**(9), 1267-1277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.005>. ISSN 0961-9534.
Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410001297>
- [58] LUO, Xun. Torrefaction of biomass – a comparative and kinetic study of thermal decomposition for Norway spruce stump, poplar and fuel tree chips. *Semantic Scholar* [online]. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Energy and Technology, 2011 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Torrefaction-of-biomass-%E2%80%93-a-comparative-and-kinetic-Luo/edecb5fd11c07b3a9008bca5127c6e27fe3b3db5>
- [59] ESEYIN, Anthonia, Philip Steele, Charles Pittman, Kieran Ekpenyong a Bhawna Soni. TGA Torrefaction Kinetics of Cedar Wood. *Journal of Biofuels*. 2016, **7**, 20. DOI: [10.5958/0976-4763.2016.00004.0](https://doi.org/10.5958/0976-4763.2016.00004.0).

- [60] REPELLIN, Vincent, Alexandre Govin, Matthieu Rolland a René Guyonnet. Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. *Biomass and Bioenergy*. 2010, **34**, 923-930. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.01.039.
- [61] STRANDBERG, Martin, Ingemar Olofsson, Linda Pommer, Susanne Wiklund-Lindström, Katarina Åberg a Anders Nordin. Effects of temperature and residence time on continuous torrefaction of spruce wood. *Fuel Processing Technology*. 2015, **134**, 387-398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.02.021>. ISSN 0378-3820. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382015000934>
- [62] KANWAL, Sumaira, Muhammad Nawaz Chaudhry, Shahid Munir a Hafiza Sana. Effect of torrefaction conditions on the physicochemical characterization of agricultural waste (sugarcane bagasse). *Waste Management*. 2019, **88**, 280-290. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.03.053.
- [63] BASTAKOTI, Niranjan. STUDY OF EFFECTS OF TEMPERATURE AND RESIDENCE TIME ON CALORIFIC VALUE OF TORREFIED BIOMASS. *International Journal of Engineering and Technology*. 2019, **07**. DOI: 10.15623/ijret.2018.0710006.
- [64] PENG, Jianghong, H. T. Bi, Shahab Sokhansanj a Jim Choon Lim. A Study of Particle Size Effect on Biomass Torrefaction and Densification. *American Chemical Society* [online]. Energy & Fuels, 2012 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef3004027>
- [65] DAHLQUIST, Erik. *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: Combustion, Gasification, Pyrolysis, Torrefaction and Fermentation* [online]. CRC Press, 2013 [cit. 2020-05-10]. ISBN 9780203120262. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=g7zLBQAAQBAJ&pg=PA229&lpg=PA229&dq=torrefaction+condensable+gas&source=bl&ots=q-NfSUdce9&sig=ACfU3U3P5m4oxNMS5uNQyyuLPilKUrB7ig&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjE9oyp9fvpAhXEoVwKHU5rA4sQ6AEwA3oECAgQAQ#v=onepage&q&f=false>
- [66] USLU, Ayla, André Faaij a P.C.A. Bergman. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*. 2008, **33**(8), 1206-1223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.03.007>. ISSN 0360-5442. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544208000893>
- [67] MÍKA, Martin, Pavlína Voláková, Břetislav Klápště, Ondřej Jankovský a Vladimír Verner. Jak potlačit spékání biomasového popela?. *Biom.cz* [online]. 2011 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/jak-potlacit-spekani-biomasoveho-popela>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A^f	Obsah popeloviny	%
C	Uhlík	
$C_6H_{12}O_6$	Glukóza	
CH_4	Methan	
CO	Oxid uhelnatý	
CO_2	Oxid uhličitý	
C_{pn}	Tepelná kapacita použité biomasy (nevysušené)	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
C_{pt}	Tepelná kapacita torefikované biomasy	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
C_{pv}	Tepelná kapacita vysušené biomasy	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
G	Hmotnost paliva	kg
H	Vodík	
h	Obsah hořlaviny	%
H_1	Hmotnost vzorku surové dřevní hmoty	kg
H_2	Hmotnost vzorku po vysušení	kg
H_2O	Voda	
H_{nev}	Nevyužité teplo (uniklé do atmosféry)	kJ
$h_{u,ohř}$	energetická účinnost procesu ohřátí biomasy na T_t	–
$h_{u,pře}$	energetická účinnost procesu předehtání biomasy	–
$h_{u,suš}$	energetická účinnost procesu sušení biomasy	–
m_0	Původní hmotnost biomasy	kg
m_1	Konečná hmotnost biomasy	kg
M_f	Hmotnost použité biomasy (nevysušené)	kg
N	Dusík	
NO_x	Oxidy dusíku	
O	Kyslík	
O_2	Dvouatomový kyslík	
Q_i^f	Výhřevnost	kJ/kg
$Q_{ohř}$	Energie potřebná pro ohřátí biomasy na teplotu torefakce	kJ
Q_{ochl}	Energie získaná při ochlazení biomasy	kJ
$Q_{pře}$	Energie potřebná pro předehtání biomasy	kJ
Q_s	Spalné teplo	kJ/kg
$Q_{suš}$	Energie potřebná pro sušení biomasy	kJ
Q_{tor}	Energie potřebná pro vykonání torefakce biomasy	kJ
r	Výparné/kondenzační teplo vody	kJ/kg
S	Síra	
SO_2	Oxid siřičitý	
T	Teplota	K
t_c	Doba ochlazení biomasy zpět na počáteční teplotu	s

t_d	Doba sušení biomasy	s
t_h	Doba do začátku sušení	s
$t_{h,int}$	Doba od konce sušení po začátek torefakce	s
T_o	Počáteční teplota	°C
$t_{ohřevu}$	Čas potřebný k zahřátí paliva na pyrolýzní teplotu	s
T_p	Konečná teplota	°C
t_r	Charakteristický čas pyrolýzní reakce	s
t_{tor}	Doba zdržení v reaktoru	s
T_{tor}	Teplota torefakce	°C
$t_{tor,c}$	Doba ochlazení do 200 °C	s
$t_{tor,h}$	Doba ohřevu nad 200 °C	s
V	Vodní hodnota kalorimetru	kJ/K
W_d	Absolutní vlhkost	%
W^r	Energetická (relativní) vlhkost	%
x_H	Obsah vodíku v surovém palivu	–
X_t	Množství tepla absorbovaného během torefakce	kJ/kg
Y_m	Hmotnostní obsah torefikované biomasy	–
$Y_{m,ztr}$	Hmotnostní ztráta	%