

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA



**POSOUZENÍ VYBRANÝCH OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ
ENERGIE S OHLEDEM NA JEJICH VLIV NA PROSTŘEDÍ**

Katedra technologických zařízení staveb

Disertační práce

(Komentovaný soubor publikovaných článků)

ING. LUKÁŠ JENÍČEK

© 2022 ČZU v Praze

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: „Posouzení vybraných obnovitelných zdrojů energie s ohledem na jejich vliv na prostředí“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním disertační práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje disertační práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že, na moji disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

JMÉNO A PŘÍJMENÍ: Ing. Lukáš Jeníček

PODPIS:

DATUM:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Janu Malatřákovi, Ph.D., za odborné a neúnavné vedení a koučování během celého studia a školiteli specialistovi doc. RNDr. Přemyslovi Jedličkovi, Ph. D za pomoc s vypracováním této disertační práce.

Dále bych rád poděkoval své manželce, za její trpělivost po večerech a dnech kdy jsem nemohl být domácnosti nijak nápomocný, ale seděl shrbený nad počítačem či knihou.

A v neposlední řadě mé rodině, že mě řádně vychovala se zájmem o studium a vědu.

Abstrakt

V zájmu snížení spotřeby fosilních paliv je vhodné hledat nové zdroje, které by se mohly stát jejich náhradou, či doplňkem. V rámci této disertační práce byly analyzovány alternativní zdroje energie, kávová sedlina, čajový odpad, skořápky ořechů a ječmen. Jednotlivé materiály byly torifikovány při teplotách od 250 °C do 550 °C a byly zhodnoceny ohledně jejich možného použití v domácnostech či průmyslu. Kávová sedlina a skořápky arašídů mohou být vhodnou alternativou pro použití v domácnostech jako paliva. Výhřevnost kávové sedliny ($19,74 \text{ MJ.kg}^{-1}$) a skořápek arašídů ($18,48 \text{ MJ.kg}^{-1}$) je vyšší než výhřevnost dřevní štěpky ($17,28 \text{ MJ.kg}^{-1}$), přičemž dopad na životní prostředí je srovnatelný. Torifikovaná kávová sedlina a skořápky pistácií při 350 °C, torifikované skořápky arašídů při 550 °C a směs torifikované dřevní štěpky při 280 °C s ječmenem mohou být vhodnou alternativou pro použití v průmyslu, pokud to pro daný podnik bude eticky či ekonomicky výhodné. Torifikovaný čajový odpad a skořápky vlašských ořechů nejsou příliš vhodné ke spalování díky vysokým koncentracím popele.

Klíčová slova: Biomasa, biopalivo, kávová sedlina, čajový odpad, skořápky, arašídů, pistácie, vlašské ořechy

Abstract

In the aim of reducing the usage of fossil fuels, it is desirable to look for new resources that could serve as a replacement or supplement to them. Alternative energy resources, coffee grounds, tea waste, nutshells and barley were analysed in this thesis. The various materials were torrefied at temperatures ranging from 250 °C to 550 °C and were evaluated for their potential use in domestic or industrial applications. Coffee grounds and peanut shells may be a suitable alternative for domestic fuel use. The calorific value of coffee grounds (19,74 MJ.kg⁻¹) and peanut shells (18,48 MJ.kg⁻¹) is higher than that of wood chips (17,28 MJ.kg⁻¹), while the environmental impact is comparable. Torrefied coffee grounds and pistachio shells at 350 °C, torrefied peanut shells at 550 °C and a mixture of torrefied wood chips at 280 °C with barley may be a suitable alternative for industrial use if it is ethically or economically advantageous for the company. Torrefied tea waste and walnut shells are not very suitable for combustion due to their high ash concentrations.

Key words: Biomass, biofuel, coffee grounds, tea waste, nuts, peanuts, pistachios, walnuts

Obsah

1. Úvod	1
2. Současný stav poznání.....	5
2.1. Trh dřevní hmoty v České republice.....	5
2.1.1. Nejčastější české dřeviny	7
2.2. Trh dřevní hmoty v Evropské unii.....	8
2.3. Trh kávy.....	10
2.4. Trh čaje	11
2.5. Trh s ořechy	11
2.6. Technologie využití biomasy pro energetické účely	12
2.7. Spalování materiálu	13
2.8. Pyrolýza	14
2.8.1. Pomalá pyrolýza – torifikace.....	15
2.8.2. Torifikace dřevní hmoty.....	17
2.8.3. Torifikace kávy, čaje a ořechů	17
2.9. Využití biouhlu	19
3. Cíle disertační práce	21
4. Hypotézy disertační práce	22
5. Metodika práce.....	23
5.1. Použité materiály	23
5.1.1. Smrková dřevní hmota (<i>Picea abies</i>).....	23
5.1.2. Ječmen (<i>Hordeum vulgare</i>)	23
5.1.3. Kávová sedlina	23
5.1.4. Čajový odpad.....	24
5.1.5. Skořápky ořechů.....	24
5.2. Metody měření.....	24
5.2.1. Horkovzdušná sušička Memmert UF30	25

5.2.2.	Střížný mlýn Retsch SM 100	25
5.2.3.	Laboratorní váha Sartorius SP124 S	26
5.2.4.	Poloautomatický kalorimetr LECO AC-600.....	27
5.2.5.	Elementární analyzátor CHN628 + S	28
5.2.6.	Analyzátor LECO TGA (Termogravimetrický analyzátor) - 701	28
5.2.7.	Torifikační jednotka.....	29
5.3.	Vlastnosti a složení materiálů.....	30
5.4.	Výpočet stechiometrie.....	32
6.	Výsledky a diskuze	35
6.1.	Analýza původního materiálu	35
6.1.1.	Prvková analýza.....	35
6.1.2.	Výhřevnost.....	37
6.2.	Prvková analýza torifikovaného materiálu.....	39
6.2.1.	Dřevní štěpka a ječmen.....	39
6.2.2.	Kávová sedlina.....	40
6.2.3.	Čajový odpad	42
6.2.4.	Skořápky vlašského ořechu.....	45
6.2.5.	Skořápky pistácie.....	46
6.2.6.	Skořápky arašíd.....	47
6.2.7.	Výhřevnost materiálu, shrnutí.....	48
6.3.	Stechiometrická analýza.....	48
6.3.1.	Přepočet výhřevnosti paliva podle ČSN 44 1353	48
6.3.2.	Hmotnostní tok paliva s požadovaným tepelným výkonem.....	49
6.4.	Emisní koncentrace malého tepelného zařízení (20kW).....	50
6.5.	Emisní koncentrace velkého tepelného zařízení (260 kW).....	51
6.5.1.	Emisní koncentrace torifikované dřevní štěpky a ječmene (260kW)	51
6.5.2.	Emisní koncentrace torifikované kávové sedliny (260kW).....	52

6.5.3. Emisní koncentrace torifikovaného čajového odpadu (260kW)	53
6.5.4. Emisní koncentrace torifikovaných skořápek ořechů (260kW).....	53
6.6. Ekonomické posouzení využití alternativních paliv.....	55
7. Závěry a doporučení.....	57
Seznam publikací autora	60
Práce publikované:	60
Práce k publikaci připravené:	60
Použitá literatura.....	61
Seznam obrázků	81
Seznam tabulek.....	82
Přílohy.....	83

1. Úvod

Nařízení Evropského parlamentu a Rady 2018/1999 o správě energetické unie a opatřeních v oblasti klimatu stanoví celoevropský cíl snížit do roku 2030 emise skleníkových plynů o 43 % ve srovnání s rokem 2005, a navýšení podílu obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie na úrovni 32 % do roku 2030.

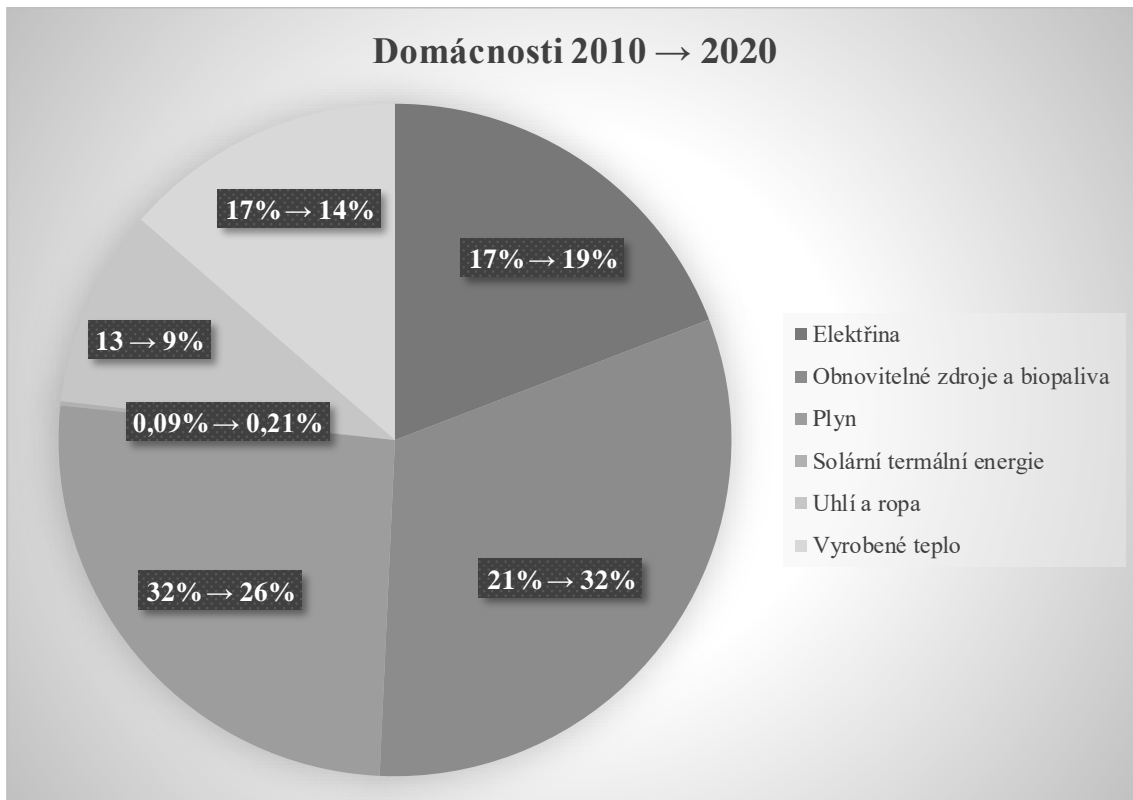
Národní plán České republiky má za cíl snížit emise skleníkových plynů do roku 2030 o 30 % (ve srovnání s rokem 2005) a navýšení podílu obnovitelných zdrojů na hrubé spotřebě energie (OZE) na úroveň 22 %.

Podle statistik organizace Global Carbon Project z roku 2015 se Česká republika umístila na 27. místě celosvětového žebříčku ze všech 221 zemí s průměrnou spotřebou 10,4 mil. tun CO₂/obyvatele, což je velkým varováním a motivací ke změně chování (Global Carbon Project 2015). Od té doby se podařilo průměrnou spotřebu snížit na 9,2 mil. tun CO₂ pro rok 2019 a 7,9 mil. tun CO₂ pro rok 2020. Výsledky za rok 2020 ale mohou být zkresleny mimořádnou změnou chování společnosti vlivem pandemie Covid 19, pro potvrzení příznivého trendu tedy budeme potřebovat výsledky CO₂ v nadcházejících letech (Statistical Review of World Energy 2021).

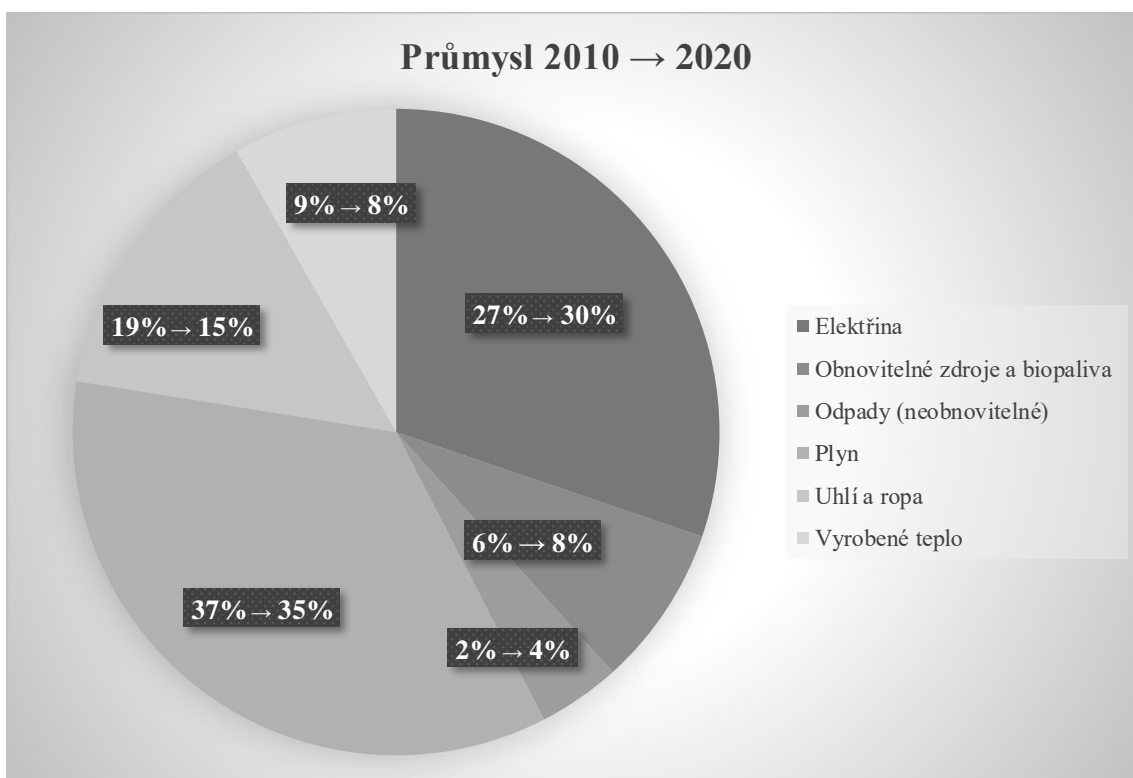
Celková spotřeba energie je v České republice za rok 2020 odhadována na 1,54 ExaJoules, neboli 1540 milionů GJ, z toho 24 % pokryla ropa, 19 % plyn, 32 % uhlí, 18 % jádro, 1 % voda a 6 % obnovitelné zdroje. Evropský průměr využití obnovitelných zdrojů energie za rok 2020 je ve výši 12 %, nejlepšího výsledku dosáhlo v roce 2020 Švédsko s 19 % pronásledované Německem a Portugalskem s 18 % (Statistical Review of World Energy 2021).

Ze statistik je patrné, že Česká republika má potenciál ve zvýšeném využívání biomasy pro energetické účely, jejíž produkce přináší řadu ekologických výhod, které přispívají ke zmírnění změny klimatu. Zvýšení biomasy se projevilo především u domácností, které jejich podíl navýšili z 21 % (2010) na 32 % (2020) jak zle nalézt v Obrázku 1. Na druhou stranu český průmysl má ve využití biomasy značnou rezervu s podílem 8 % v roce 2020, Obrázek 2. Biomasa je obnovitelný materiál, který je považován za uhlíkově neutrální, a pomáhá tak čelit emisím skleníkových plynů (García et al. 2019). Do popředí se dostává a je velmi aktuální využití biomasy z materiálů ze zemědělské produkce a odpadní biomasy, jejíž potenciál nelze opomíjet (Kažimirova, Kubik, Mihina 2020). Význam

obnovitelných zdrojů energie se stává jedním z hlavních faktorů trvale udržitelného rozvoje nejen v zemědělství, ale i v celé společnosti.

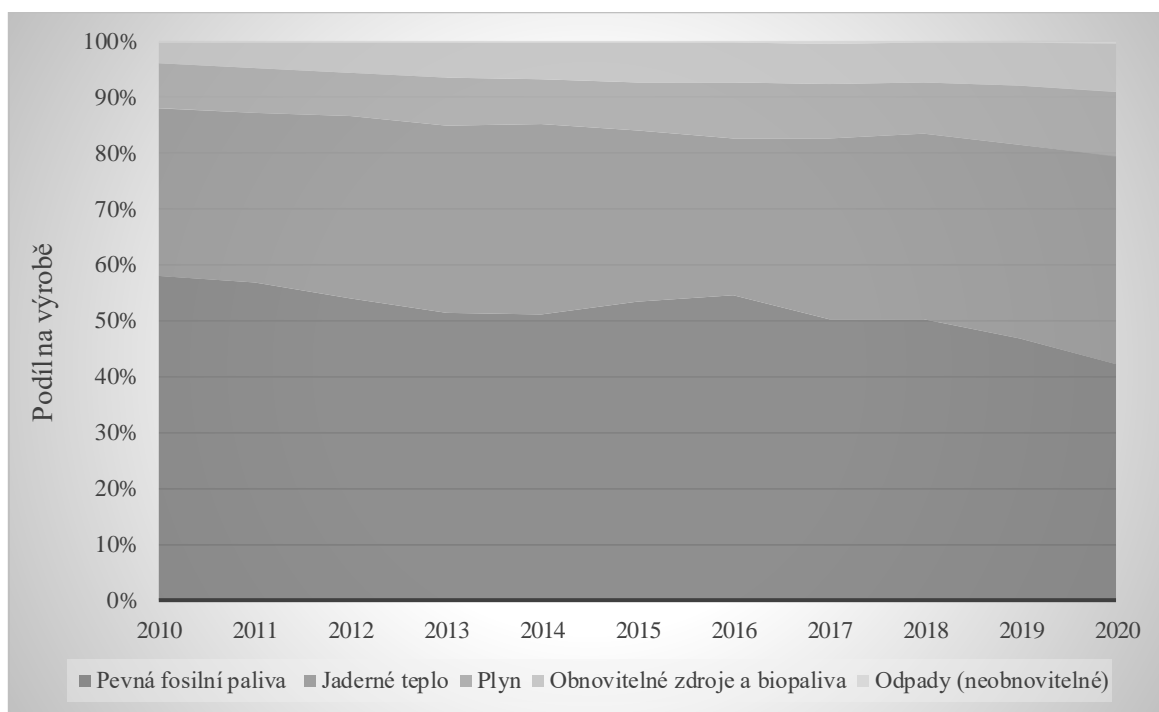


Obrázek 1: Vývoj spotřeby energií českých domácností v letech 2010 a 2020 (zdroj: ČSÚ)



Obrázek 2: Vývoj spotřeby energií českého průmyslu v letech 2010 a 2020 (zdroj: ČSÚ)

Pro ucelení obrázku spotřeby energií v České republice je důležitý i rozpad položek „elektřina“ a „vyrobené teplo“ neboť tyto nejsou primárním zdrojem energie, ale již vyrobenou energií z jiných primárních surovin. I přes dlouhodobý pokles, výrazný podíl na výrobě energií si v České republice zachovávají fosilní paliva, především hnědé a černé uhlí. Kompenzací z tohoto poklesu je především energie z jádra, plynu a obnovitelných zdrojů energie.



Obrázek 3: Rozpad výroby energií v ČR dle vstupu (zdroj: ČSÚ)

Omezené zásoby fosilních paliv, ochrana přírody snížením emisí skleníkových plynů, eliminace produkce odpadků zavedením oběhového hospodářství a snížení evropské závislosti na ruských fosilních palivech jsou jen některé z mnoha motivů pro hledání nových přírodních zdrojů, zejména v oblasti odpadní biomasy.

V roce 2020 bylo v Evropské unii vyprodukováno 505 kg komunálního odpadu v přepočtu na jednoho obyvatele. Z toho bylo 48 % odpadu recyklováno či kompostováno. V České republice bylo v roce 2020 vyprodukováno 543 kg komunálního odpadu na jednoho obyvatele, lehce nad průměrem EU. V roce 1995 činil průměr na obyvatele 467 kg v EU (8% nárůst) a 302 kg v České republice (68% nárůst). V rámci dohánění životní úrovně Evropy, tak Česká republika Evropu předstihla v míře produkce komunálního odpadu (Eurostat 2020).

V konceptu oběhového hospodářství by se odpad měl znovu dostat do výrobního toku jako recyklovatelný nebo kompostovatelný materiál nebo jako energeticky využitelný spalováním.

Technologie obnovitelných zdrojů energie, jako je solární, vodní, větrná, biomasová a geotermální energie, získávají stále větší pozornost a díky místním a přírodním zdrojům podporují hospodářský růst (Okedu et al. 2020).

Biomasa je biologicky odbouratelný a nefosilní organický materiál získávaný z hojných, čistých a uhlíkově neutrálních rostlin, řas a živočichů, který lze potenciálně využít jako zdroj bioenergie nahrazující fosilní paliva (Espina, Barroca, Abundo 2022). V současné době tvoří energie z biomasy největší část obnovitelných zdrojů energie a poskytuje pětikrát více energie než příspěvek větrné a solární energie k celosvětové spotřebě energie, a to i s vyloučením tradičního využití (IEA 2017).

Biomasa z přeměn zemědělských plodin, jako jsou piliny (Garrido, Conesa, Garcia 2017), bagasa (Lubwama, Yiga 2017), kávové slupky (Lubwama, Yiga 2018), slupky cukrové třtiny (Brunerová, Roubík, Brožek 2018) a skořápky podzemnice olejné (Lubwama, Yiga 2017), má obrovské množství a v rozvojových zemích se využívá jako pevné palivo pro vaření a vytápění v domácnostech (Purohit, Chaturvedi 2018).

Tato disertační práce prozkoumá další oblasti možnosti využití biomasy pro energetické účely pro domácnosti a průmysl. U domácností se předpokládá využití čisté neupravené odpadní biomasy pro energetické účely, aby se eliminovala zbytečná logistika malých množství, u průmyslu pak využití upravené odpadní biomasy pro zlepšení palivových vlastností materiálu využitého ve větších objemech.

2. Současný stav poznání

2.1. Trh dřevní hmoty v České republice

Nejběžnější biomasou, která se využívá k vytápění již dlouhodobě, je dřevní hmota. V České republice je lesem pokryto 2,9 mil. ha, což je zhruba třetina celého území. Hustota zalesnění českých lesů je $246 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Průměrný roční přírůstek tak činí 18 mil. m^3 dřevní hmoty (tj. $7,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). Průměrná roční výtěžnost je na úrovni 14–15 mil. m^3 dřevní hmoty. Zásoba dřevní hmoty tak až na výjimečné situace, rok od roku stoupá. Jednou z výjimek byl rok 2019, kdy vinou kůrovcové kalamity vzrostla výtěžnost na 111 % hodnoty přírůstku (Lesy ČR 2022).

V kontextu Evropy je Česká republika v pořadí zalesněnosti na 12. místě a v porovnání tempa přírůstku na sklonku žebříčku s průměrným přírůstkem ve výši 3,9 % dřevní hmoty. Co Českou republiku řadí na přední příčky, je vysoká přidaná hodnota odlesněného materiálu s průměrnou cenou $349 \text{ EUR} \cdot \text{ha}^{-1}$ v roce 2019 (může být ovlivněno zvýšenou těžbou vlivem kůrovcové kalamity). Lesní těžba představovala v roce 2019 přírůstek 0,4 % HDP. Pro lepší přehled uvádím výsledky v Tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled trhu dřív v EU (zdroj: Eurostat)

	Česká republika	Evropská unie	Max.	Min.
Pokrytá plocha	2,7 mil. ha (34 %)	159 mil. ha (39 %)	Finsko (66 %)	Nizozemsko (10 %)
Zásoby dřevní hmoty	774 mil. m^3 (2,7 %)	28 381 mil. m^3 (100 %)	Německo (13 %)	Lucembursko (0,12 %)
Hustota zalesnění	$289 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	$178 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	Lucembursko ($390 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	Portugalsko ($52,82 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)
Roční přírůstek	30 mil. m^3 (3,9 %)	905 mil. m^3 (3,2 %)	Portugalsko (13,2 %)	Bulharsko (2 %)
Roční výtěžnost	33 mil. m^3 (4,4 %)	575 mil. m^3 (2,0 %)	Portugalsko (9,8 %)	Rumunsko (0,7 %)

V bývalém Československu se v období po druhé světové válce využití dřeva v národním hospodářství výrazně ponížilo, kdy bylo zařazeno mezi strategické suroviny a s kterými bylo nutno při tuzemském užití šetřit. Tento trend se bohužel přechovává až dodnes, držíci

Českou republiku v této oblasti na chvostě Evropy. Plánem je, aby se během následujících 10 let spotřeba dřeva na jednoho obyvatele v ČR zdvojnásobila z nynějších 0,23 m³ ročně na 0,46 m³ ročně. Podobného scénáře se podařilo dosáhnout v Rakousku, kde byl během posledních 15 let zaznamenán vzrůst spotřeby dřeva na jednoho obyvatele z 0,30 m³ ročně na 0,62 m³ ročně. Nejvyšší spotřeba dřevní hmoty je ve Skandinávii, kde je na čele Finsko s 1,00 m³ ročně na jednoho obyvatele.

V roce 2019 obor dřevozpracujícího průmyslu zaměstnával v České republice více než 207 tis. pracovníků, což je zhruba 16% podíl na zaměstnanosti celého zpracovatelského průmyslu. Počet zaměstnanců v lesním hospodářství dlouhodobě klesá a nyní se pohybuje kolem 21 000 pracovníků (v roce 1990 to bylo 37 000 pracovníků).

Těžba dřevní hmoty má krom získávání cenného materiálu další důležité cíle. Mezi tyto cíle se řadí zvyšování stability, kvality, odolnosti a druhové rozmanitosti lesa v mladším věku (tzv. těžba výchovná) a dále pak zahájení přirozených procesů obnovy lesa novými kvalitnějšími, odolnějšími a druhově pestřejšími následnými lesními porosty u porostů starších (tzv. těžba obnovní). Dalším cílem je provádění těžby v lesích, kde je nutné odstranění stromů nemocných, poškozených a napadených různými škůdci a chorobami, aby nedošlo k šíření těchto škůdců a chorob na jiné zdravé stromy.

Každá lesní těžba musí být vždy realizována v souladu s platnými legislativními předpisy a v souladu se strategií trvale udržitelného hospodaření v lesích. S trvale udržitelným rozvojem těžby pomáhají různé programy, jedním z nich je systém PEFC – Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC 2022). Tyto osvědčení jsou dokladem prokazujícím, že příslušné lesní hospodářské celky jsou součástí certifikovaného regionu Česká republika a hospodaří na nich v souladu se schválenými standardy trvale udržitelného hospodaření v lesích podle Českého systému certifikace lesů.

Získání osvědčení dává vlastníkům lesů možnost využít práva na používání loga PEFC, které jim může pomoci s uplatněním produkce dřevní hmoty na trhu. Odběratelé a zpracovatelé dřevní hmoty totiž ve stále větší míře vyžadují dřevní hmotu certifikovanou. Certifikace lesa se tak stává nejen nástrojem podporujícím trvale udržitelné hospodaření, ale i nástrojem tržním.

Dle nadace Dřevo pro život, je dřevní hmota z dobře obhospodařovaných lesů obnovitelnou surovinou a jeho používání je šetrné k životnímu prostředí. Nadace Dřevo pro život byla založena v květnu roku 2005 na podporu využívání dřeva jako obnovitelné

suroviny, jejím spoluzakladatelem je i státní podnik Lesy České republiky (Dřevo pro život 2022).

2.1.1. Nejčastější české dřeviny

Smrk

Smrková dřevní hmota má dlouhá vlákna, která jsou sametová, hedvábná, voní pryskyřicí, je poměrně lehká, pevná a snadno se štípe. Navzdory své měkkosti je smrk pružný, přiměřeně pevný a ohebný. Vzhledem k tomu, že smrková dřevní hmota má vynikající vlastnosti při zpracování, stala se naší nejoblíbenější dřevinou. Smrkovou dřevní hmotu lze jednoduše řezat, hoblovat, frézovat, klínovat, mořit, natírat a mořit. Zhoršuje se a smršťuje jen nepatrně. V suchých podmínkách je poměrně odolná. Smrkové dřevo používají truhláři k výrobě tzv. rustikálního (měkkého) nábytku. Na trámy, krokve, bednění a podhledy jej využívají tesaři. Ze starých trámů se vyrábějí repliky truhel, komod, skříní atd. Na bednění, stěrky a podlahy lešení využívají smrk zedníci. Smrková buničina je důležitou součástí papírenských surovin. Smrková buničina má bělavou až nahnědlou barvu a nápadné letokruhy. Jarní a letní přírůstky dřeva lze rozlišit podle jedinečných barevných změn ve všech třech částech (příčné, podélné a styčné). Takzvaný rezonanční smrk, z něhož se vyrábějí hudební nástroje, protože má kmen s vysokou hustotou letokruhů, je vzácný (Lesy ČR 2022).

Borovice

Borovicová dřevní hmota je křehčí než smrková, ale přesto velmi pevná a měkká. Borovicová dřevní hmota se díky své trvanlivosti používá především na výrobu oken a dveří včetně ráků. Dobře se hodí také na podlahové "polštáře", pražce a trámy. Ve srovnání se smrkem je odolnější vůči mořidlům a nátěrům. Jádrové dřevo se hůře lepí. Značné zanášení nástrojů a brusných materiálů pryskyřicí je však hlavní nevýhodou při opracování a broušení. Bělavé až okrové barvy, jádrové dřevo borovice je oranžovohnědé až rezavé. Pampelišky vynikají. Při nesprávném ošetření vzniká na buničině výrazné modrání, které ji ničí (Lesy ČR 2022).

Modřín

Modřínová dřevní hmota je pevná a trvanlivá a je tvrdší než smrková nebo borová. Používá se k výrobě obložení, schodů, zábradlí, robustního nábytku, šindelů a dalších materiálů. Jádro modřínu je okrové až červenohnědé, dřevo má světle žlutohnědou barvu. Po impregnaci v atmosféře tmavne. Jeho struktura (kroužková kresba) je hustší než

u smrku a vyniká krásou četných malých, především dobře rostlých částí. Dobře se opracovává, méně, než borovice se lepí na nástroje a je tolerantnější k lepidlům a nafukování (Lesy ČR 2022).

2.2. Trh dřevní hmoty v Evropské unii

V roce 2020 měla Evropská unie (EU) podle odhadů 159 milionů hektarů lesů (bez ostatní zalesněné půdy) a jejich plocha se od roku 1990 zvýšila téměř o 10 %. Rozloha lesů se zvýšila ve všech zemích EU s výjimkou Švédska, kde se odhaduje mírný pokles o 0,3 %, a Portugalska, kde se rozloha lesů v období 1990-2020 snížila o 3 %. K největšímu nárůstu došlo v Irsku (69 %), Španělsku (34 %) a na Maltě (31 %); v Irsku a na Maltě však lesy pokrývají jen malý podíl půdy, 11 %, resp. 1 %. Ze zemí, kde lesy pokrývají alespoň polovinu území státu, zaznamenaly největší nárůst plochy lesů v letech 1990-2020 Estonsko (11 %) a Lotyšsko (7 %). V absolutním vyjádření se odhaduje, že k největšímu nárůstu plochy lesů došlo ve Španělsku (4,7 mil. ha), Francii (2,8 mil. ha) a Itálii (2,0 mil. ha).

Co do zásob dřeva v lese, v roce 2019 činily zásoby EU odhadem 28,4 miliardy m³. Největší podíl na zásobách má Německo (13,4 %), následované Švédskem (12,5 %) a Francií (11,8 %). Rostoucí zásoby dřeva v lesích EU se zvýšily ve všech členských státech, což na úrovni EU v období 2000-2019 představuje nárůst o 29 %. Poměrově byl nárůst největší pro Irsko (115 %), Francii (61 %) a Itálii (57 %). V České republice narostl objem mezi lety 2000 a 2019 o 15 % na 774 tisíc hektarů což je 2,7 % evropských zásob dřeva (Eurostat 2021).

V roce 2019 bylo vytěženo 63 % čistého ročního přírůstu dřeva v lesích EU, přičemž se lesnictví a těžba dřeva podílely na celkovém HDP téměř 0,2 % a zaměstnávaly přibližně 517 000 osob. Ve třech zemích přesáhly těžby v roce 2019 téměř 90 % čistého přírůstu: v Česku (111 % - vinou kůrovcové kalamity), Nizozemsku (96 %) a Německu (94 %). Naopak, na Kypru, bylo v roce 2019 vytěženo jen 6 % přírůstu.

Celková hrubá přidaná hodnota vytvořená lesnictvím a těžbou dřeva v EU činila v roce 2019 celkem 25,3 miliardy EUR. V absolutním vyjádření vytvořila tato odvětví v roce 2019 největší hodnotu ve Finsku (4,2 mld. EUR), Švédsku (3,5 mld. EUR) a Francii (3,3 mld. EUR). V České republice tvořila přidaná hodnota v roce 2019 hodnotu 933 milionů EUR.

Hrubá přidaná hodnota lesnictví a těžebního průmyslu představovala v roce 2019 hodnoty 0,18 % HDP EU, což je o 15 % méně než podíl 0,21 % v roce 2000. I přes absolutní růst tak lesnický a těžební průmysl postupně klesá na hospodářském významu EU. Nejvýznamněji se na HDP země podepsal obor lesnictví a těžebního průmyslu v roce 2019 v Lotyšsku (1,8 %), Finsku (1,7 %) a Estonsku (1,3 %); ve všech ostatních členských státech byl menší než 1 %. V České republice se obor lesnictví a těžebního průmyslu podílel na HDP ve výši 0,4 %, přičemž v roce 2000 to bylo na úrovni 0,6 %.

V roce 2019 vytvořily lesy zemí EU přidanou hodnotu v průměrné výši 159 EUR.ha⁻¹. Největší přidaná hodnota na plochu lesa byla v roce 2019 odhadována v Nizozemsku (464 EUR.ha⁻¹), Dánsku (380 EUR.ha⁻¹) a Česku (349 EUR.ha⁻¹). Nejmenší přidaná hodnota je pak za rok 2019 na Kypru (13 EUR.ha⁻¹) a Řecku (15 EUR.ha⁻¹). Přestože tento ukazatel může být ovlivněn druhem činností vykonávaných v odvětví lesnictví a těžby dřeva, lze jej použít jako ukazatel ekonomické produktivity lesnických činností v celé EU.

V roce 2019 pracovalo v EU v odvětví lesnictví a těžby dřeva přibližně 517 tisíc osob, což ve srovnání s rokem 2000 představovalo pokles o 7 %. Nejvíce pracovníků bylo zaznamenáno v Polsku s 63 tisíci osobami, Rumunsku s 58 tisíci osobami a Švédsku s 41 tisíci osobami. V České republice je to 21 tisíc osob.

Poměr vložené práce na plochu lesa udává pracovní náročnost odvětví v jednotlivých členských státech EU. Tento ukazatel se v jednotlivých zemích značně liší, od 13,2 zaměstnaných osob na 1000 hektarů na Slovensku až po méně než dvě osoby na 1000 hektarů ve Španělsku, Finsku, Švédsku a Francii (viz tabulka 2 a obrázek 5). Některé rozdíly mezi členskými státy EU mohou odrážet také rozdíly v způsobech hospodaření, hustotě porostních zásob, převládajících druzích dřevin a terénu.

Produktivita práce v odvětví lesnictví a těžby dřeva (počítaná jako hrubá přidaná hodnota na zaměstnance) se v roce 2019 v jednotlivých členských státech EU rovněž značně lišila. Nejvyšší úroveň produktivity práce byla zaznamenána ve Finsku v průměrné výši 192 tisíc EUR na zaměstnanou osobu a ve Francii 118 tisíc EUR na zaměstnanou osobu. Na opačném konci rozpětí se nacházely Kypr a Řecko, kde byla produktivita práce v tomto odvětví 4900 EUR na zaměstnanou osobu, resp. 5700 EUR na zaměstnanou osobu. V České republice byla produktivita práce v roce 2019 na úrovni 44 tisíc EUR na zaměstnanou osobu.

Evropské statistiky lesnictví a těžby dřeva včetně stavu a změn rozloh lesů, objemu dřeva v lesích a jeho využití v těžebním průmyslu pravidelně vycházejí v datech Eurostatu – European Forests Accounts. Jsou zde uvedeny ukazatele kombinující jak fyzické, tak ekonomické údaje.

Na EU připadá přibližně 5 % světových lesů a na rozdíl od situace v mnoha jiných částech světa se zalesněná plocha EU pomalu zvětšuje. Evropské lesy jsou důležitým faktorem při zmírňování změny klimatu. Ze socioekonomického hlediska se lesy liší od malých rodinných podniků přes státní lesy až po majetky vlastněné velkými společnostmi. Lesy poskytují také širokou škálu ekosystémových služeb, z nichž většinu ekonomické účty a statistiky nezaznamenávají, například vázání uhlíku, ochranu půdy před erozí nebo poskytování příležitostí k rekreaci (Eurostat 2021).

2.3.Trh kávy

Slovo káva má původ z roku 1582 prostřednictvím nizozemského koffie, které bylo převzato z osmanského tureckého kahve (قهوه), jež bylo zase převzato z arabského qahwah (قهوة) (Oxford English Dictionary 1893). Arabské slovo qahwah tradičně označovalo druh vína, jehož etymologii arabští lexikografové uvádějí jako odvozenou od slovesa قَهِيَ qahiya, "postrádat hlad", v narážce na pověst nápoje jako prostředku potlačujícího chuť k jídlu. Termíny coffee pot a coffee break vznikly v roce 1705, resp. 1952 (Online Etymology Dictionary 2015).

Káva má dlouhou historii a široké využití, konzumuje se již více než 1 000 let. V roce 2020 se celosvětová produkce kávy pohybovala na úrovni 175 mil. 60 kg pytlů, což odpovídá 10,5 milionům tun kávy (ICO 2022). Spotřeba kávy je na velmi podobné úrovni, a to 166 mil. 60 kg pytlů, což představuje 9,9 milionů tun (Rajesh Banu et al. 2021). Uvážíme-li, že na přípravu 1 šálku se spotřebuje 9 g kávy, bylo v roce 2020 připraveno více než bilion šálků. V roce 2011 to bylo 400 miliard šálků (Mussatto et al. 2011).

V České republice je spotřeba kávy na úrovni 2,4 kg na osobu ročně, což odpovídá zhruba 300 šálkům kávy na osobu v roce 2020. Celkem se tak vypily přibližně 3 mld. šálků kávy produkující přibližně 24 tisíc tun odpadové kávy (Kovalčík, Obruca, Marova 2018).

Káva je velmi bohatá na minerály. Kávová zrna se skládají z mnoha složek, včetně celulózy, cukrů, minerálních látek, lipidů, polyfenolů a tříslovin (Richelle, Tavazzi, Offord 2001; Ballesteros, Teixeira, Mussatto 2014; Malara et al. 2018; Cruz et al. 2012). Mezi minerální látky patří i hořčík, draslík, vápník, železo, sodík, nikl, mangan,

stroncium, baryum, chrom, rubidium, zinek, měď, vanad, kobalt, molybden, titan, olovo a kadmium (Belitz, Grosch, Schieberle 2009; Pujol et al. 2013; Fraňková et al. 2009).

2.4. Trh čaje

Další z materiálů, který je celosvětově spotřebováván a zanechává velký podíl opětovně využitelného odpadu, je čaj. Čaj je sušený listový nápoj získávaný z listů *Camellia sinensis* a je druhým nejoblíbenějším nealkoholickým nápojem na světě s celosvětovou produkcí téměř 6 milionů tun v roce 2017. Čaj se stal velmi oblíbeným nápojem díky převládající čajové kultuře. Rostoucí zdravotní povědomí a vyšší příjmy dále napomohly růstu trhu s čajem. Rostoucí trend spotřeby kávy však působí na trh s čajem jako hlavní brzda a nepomáhají ani kolísající ceny čaje v důsledku nepředvídatelných klimatických podmínek (Vivek 2019).

V České republice je spotřeba čaje za posledních 10 let stabilní na úrovni 200 g na osobu, tj. přibližně 100–130 šálků čaje ročně (ČSÚ 2020). Mezi nejoblíbenější čaje patří černý a zelený, obliba bylinných a ovocných čajů ale tento rozdíl pomalu dohání. Očekává se růst poptávky po bylinných čajích a uvedení nových rozmanitých příchutí.

Obrovská spotřeba čaje vede k podobným problémům s odpadem jako u kávy, neboť více než 90 % čaje zůstává po spotřebě jako odpad (Akbayrak, Özçifçi, Tabak 2020). Čajový odpad lze klasifikovat jako odpad z lignocelulózové biomasy, který vzniká během procesu vaření čaje spadající do skupiny odpadů z domácností i z průmyslu. Čajový odpad je již zkoumán v mnoha oblastech opětovného využití.

2.5. Trh s ořechy

Ořechové skořápky představují další trh, na který je vhodné se zaměřit při zkoumání možnosti dalšího použití odpadů. Ořech je plod složený z tvrdé skořápky a semene, které je většinou jedlé. V obecném kontextu se však jako ořechy označují také nejrůznější sušená semena, mezi něž patří i některá semena bez tvrdé skořápky (např. piniové oříšky).

V České republice spotřeba ořechů mírně roste a v roce 2020 činila 4 kg na osobu. Průměrný podíl váhy skořápky na jádru ořechu závisí od odrůdy. U pistácií činí váha skořápky okolo 50 %, u vlašských ořechů váží skořápka okolo 55 % a u arašídových ořechů je to 60 %. Celková spotřeba je tak na úrovni 40 tisíc tun. Při uvažování ořechové skořápky jako zdroje pro další využití, jedná se o 24 tisíc tun materiálu.

Evropská unie je největším světovým trhem s jedlými ořechy, které představují více než 40 % celkového světového dovozu. Objem dovozu se neustále zvyšuje. Velké dovozní a spotřebitelské trhy, jako je Nizozemsko, Německo, Francie a Spojené království, nabízejí příležitosti pro vývozce z rozvojových zemí. Hlavními trendy, které podporují rostoucí spotřebu jedlých ořechů a sušeného ovoce, jsou přírodní, nízkosacharidové a zdraví prospěšné výrobky (CBI 2022).

Jedlé ořechy jsou se sušeným ovocem dvě různé skupiny produktů, které jsou v mezinárodním obchodě obvykle obchodovány stejnými společnostmi. Důvodem je jejich delší trvanlivost ve srovnání s čerstvým ovocem a zeleninou a podobné podmínky skladování a manipulace. Jedlé ořechy a sušené ovoce se také používají podobným způsobem: jako pochutiny nebo jako kulinářské přísady do pekařských či cukrářských výrobků.

Výhled dovozu jedlých skořápkových plodů a sušeného ovoce v Evropě je dlouhodobě pozitivní a očekává se, že dovoz bude v nadcházejících letech nadále růst.

Od roku 2013 celkový evropský dovoz jedlých skořápkových plodů a sušeného ovoce ročně roste o 9 % v hodnotě a v roce 2017 dosáhl 11,3 miliardy EUR. Ve stejném období dovoz každoročně rostl o 3 % v množství a dosáhl 2,9 milionu tun (ČSÚ 2020).

Přibližně 35 % celkové hodnoty evropského dovozu ze zemí mimo Evropu pochází ze Spojených států dovážející především mandle a vlašské ořechy. Dalším důležitým trhem je pro Evropu Turecko s podílem 14 %, dovážející především lískové ořechy. Největší nárůst za posledních 5 let pak patří zemím jako Ázerbájdžán (meziroční nárůst o 40 %; hlavně lískové ořechy), Vietnam (39 %; hlavně kešu ořechy), Egypt (21 %; arašídny), Belgie (16 %; reexport mandlí a pistácií) a Chile (14 %; vlašské ořechy). Významné vnitroeuropejské dovozy zahrnují jak reexporty (např. arašídny z Nizozemska), tak vlastní produkci jednotlivých zemí (např. mandle ze Španělska) (ČSÚ 2020).

2.6. Technologie využití biomasy pro energetické účely

Využití biomasy pro energetické účely je možné rozdělit na suché procesy (termochemické):

- i) spalování,
- ii) zplyňování,
- iii) nízkoteplotní pyrolýzu (torifikaci) a
- iv) vysokoteplotní pyrolýzu.

A dále na procesy mokré (biochemické):

- i) anaerobní vyhnívání (metanové kvašení),
- ii) lihové kvašení a
- iii) výrobu biovodíku.

Poslední metodou je mechanicko-chemická přeměna, lisováním olejů s jejich následnou úpravou, např. výroba bionafty a přírodních maziv.

2.7. Spalování materiálu

Oheň je důležitým prvkem technologického rozvoje lidstva. Moment ovládnutí ohně člověkem je odhadován v rozmezí před 1,7 až 2 milionů let (James et al. 1989). Oheň poskytl zdroj tepla, ochranu před predátory, možnost upravit lovecké nástroje, a nový způsob přípravy jídla.

Mikroskopické stopy dřevěného popela byly prokázány na nalezištích obývaných rodem *Homo erectus* starých asi jeden milion let (Berna et al. 2012). Nejstarší nalezená stopa spojená s vařením pochází Izraele, kde vědci z Hebrew University podrobili analýze zbytky kaprovité ryby nalezené na archeologickém nalezišti Gesher Benot Ya'aqov se závěry, že ryba byla uvařena před zhruba 780 000 lety (Zohar et al. 2022). Stopa spojená s využitím ohně pro úpravu zbraní byla nalezena před 300 000 lety v Maroku, nálezem vypálené čepele v blízkosti fosilií raného *Homo sapiens* (Hublin et al. 2017).

Tyto kulturní pokroky umožnily geografické rozšíření lidského druhu, změny v chování a pravděpodobně i v cítění a myšlení. Vytvoření ohně umožnilo rozšíření mnoha činností do temnějších a chladnějších částí večera. Okouzlení ohněm stálo pravděpodobně také u zrodu prvních rituálů, a tedy i duchovního života člověka.

V moderní historii má oheň výrazný podíl na rozvoji mobility vynálezem parního stroje v druhé polovině 18. století, připisovaný Jamesi Wattovi (Jílek, Kuba, Jílková 1979).

V dnešní době je oheň základním prvkem průmyslu, ve zpracování nerostných surovin (železa, skla) a dále ve výrobě elektrické energie a tepla. Primárním zdrojem pro spalování jsou fosilní zdroje, tj. uhlí a plyn, dále pak biomasa (např. dřevní hmota), a odpady, viz Obrázky 1 a 2 v úvodu této práce.

Rozšířené spalování fosilní paliv a odpadů má ale také negativní dopad, a to na přírodní prostředí, nepřirozeným vypouštěním CO₂ a dalších plynů do atmosféry. Od 60. let 20. století rostoucí environmentální hnutí volá po koordinované a institucionalizované mezinárodní spolupráci s cílem ochrany prostředí. Tento tlak vyústil v roce 1972, kdy se

ve Stockholmu konala přelomová Konference OSN o životním prostředí člověka, na níž byl stanoven koncept práva na zdravé životní prostředí a vytvořen Program OSN (Borowy, Iris 2019). Mezi následné nejznámější mezinárodní dohody patří Kjótský protokol z roku 1997 a Pařížská dohoda z roku 2015.

V České republice ochranu životního prostředí chrání mimo jiné zákon o ochraně ovzduší z roku 2012 (Ministerstvo životního prostředí 2021). V příloze zákona, části III, jsou povolené emisní koncentrace paliv pro daný tepelný výkon spalovacího zařízení, včetně specifikace pro spalování biomasy.

Tuhá paliva je možné spalovat několika způsoby, na pevném roštu, pohyblivém roštu, fluidně, v bubnové rotační peci, šachtové peci, etážové peci, muflové či komorové peci. Postup spalování lze pokaždé rozdělit do čtyř fází:

- i) fáze sušení. ve které se odpařuje voda z paliva,
- ii) fáze uvolnění plynné složky paliva do prostoru,
- iii) fáze spalování plynné složky paliva a
- iv) fáze spalování pevných látek paliva, zejména uhlíku.

Spalování biomasy má svá specifika. Biomasa je definována jako substance biologického původu, a to buď záměrně vyráběná, či získána jako odpad ze zemědělské, potravinářské či lesní výroby. Způsob využití biomasy k energetickým účelům je do značné míry předurčen jejími fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Velmi důležitým parametrem při spalování biomasy je vlhkost, resp. obsah sušiny v biomase. V současné době je možné vyrobit spalovací zařízení na tuhá biopaliva o minimálním výkonu asi 17 kW při splnění podmínek účinnosti spalovacího procesu a co nejmenšího vlivu na životní prostředí. V těchto spalovacích zařízeních je nejobvyklejším palivem kusové dříví (polena), pelety a brikety. Při spalování je pro biomasu specifické, že mezi tuhými palivy obsahuje nejvyšší podíl pyrolýzou uvolňovaných plynných látek (75 až 85 %) nehořících na roštu, ale ve vztahu mezi roštem a komínem (nazýváno jako dlouhý plamen).

2.8. Pyrolýza

Pyrolýza (pyros = oheň a lysis = štěpení) je definována jako souhrn termochemických degradačních reakcí probíhajících v nepřítomnosti nebo omezené přítomnosti kyslíku. Pyrolýza se dělí na nízkoteplotní pomalou pyrolýzu, známou jako hydrotermální karbonizaci nebo torifikaci, která probíhá při relativně nízkých teplotách 300–600 °C a vysokoteplotní rychlou pyrolýzu, známou také jako blesková pyrolýza, která probíhá

při teplotách 450–900 °C. Produkty pyrolýzy jsou většinou plyny, kapaliny a uhlí. Složení těchto produktů závisí na pyrolýzní metodě zpracování a na reakčních parametrech. Rychlá nebo blesková pyrolýza je používána pro maximální produkci plynů a kapalných produktů, poskytující především tepelný užitek. Pomalá pyrolýza se používá především pro produkci dřevěného uhlí.

2.8.1. Pomalá pyrolýza – torifikace

Torifikace je termochemický proces, při kterém se biomasa pomalu zahřívá a přeměňuje se na materiál podobný uhlí neboli proces řízené karbonizace, při kterém se biomasa zahřívá v rozmezí teplot 230 °C až 340 °C v bezkyslíkatém inertním prostředí nebo za přítomnosti jen malého množství kyslíku (Tamelová et al. 2021).

Torifikovaná biomasa má oproti tradiční biomase několik výhod: vyšší výhřevnost (množství energie na jednotku hmotnosti), vyšší energetickou hustotu (množství energie na jednotku objemu) a lepší rozsah fyzikálních vlastností, jako je rozměrová stabilita, homogenita a hydrofobní chování. Dále, zejména pokud jde o rostlinnou biomasu, odpadají u torifikované biomasy problémy spojené se spalováním, např. zanášení, spékání, koroze chlórů (Skanderová, Malat'ák, Bradna 2015).

Mezi další výhody torifikace jako procesu předúpravy při termochemické konverzi patří snížení vlhkosti biomasy, což vede k již zmíněnému zlepšení objemové a energetické hustoty; nižší poměr kyslíku k uhlíku (O/C), což zvyšuje výhřevnost biomasy (Wang et al. 2011); vyšší hydrofobicitu, takže si udržuje nižší vlhkost a lépe se přepravuje a skladuje (Hakkou et al. 2006); a lepší zápalnost, reaktivitu a rozdělitelnost, takže se šetří energie při procesech mletí nebo rozmělnování (Arias et al. 2008).

Mnohé studie ukázaly, že výhřevnost surovin z biomasy se při torifikaci výrazně zlepšila (Wang, Dai, Ru, et al. 2017).

Během procesu torifikace dochází k destrukci chemické struktury biomasy, což vede k významnému odstranění kyslíku a zvýšení výhřevnosti (Chen et al. 2018) a k vyšší účinnosti zplyňování. Proces torifikace výrazně snižuje množství kyslíku v biomase, pokud se provádí při vysokých teplotách kolem 300 °C (Arnsfeld, Senk, Gudenau 2014).

Wang a spol. zjistili, že torifikace může účinně snížit obsah kyslíku a poměr O/C v celulóze a hemicelulóze. Pokud jde o lignin, teplota torifikace (200 a 225 °C) může způsobit polykondenzaci a de-metoxylaci aromatických jednotek ligninu; a s odstraněním

kyslíku se při torifikaci zvýšil obsah vazeb CeC a CeH v ligninu, zatímco obsah vazeb CeO a OeH se snížil (Wang et al. 2016).

Při termické analýze biomasy došlo k rychlé pyrolýze hemicelulózy a celulózy, přičemž k úbytku hmotnosti hemicelulózy docházelo především při 220-315 °C a celulózy při 315-400 °C. Lignin se však rozkládal obtížněji, neboť k jeho hmotnostnímu úbytku docházelo v širokém teplotním rozmezí (od 160 do 900 °C) a vzniklý pevný zbytek byl velmi vysoký (~40 % hm.) (Yang et al. 2007).

Zheng poukázal na to, že pořadí tepelné stability během torifikace bylo následující: celulóza > lignin > hemicelulóza a jejich strukturní změny zjevně ovlivnily následné chování během torifikace (Zheng et al. 2015). Proces tepelného zpracování nejprve odstraní většinu vlastní hemicelulózy a amorfní celulózy v biomase, ale lignin ponechá většinou nedotčený (Melkior et al. 2012).

Torifikace biomasy má i řadu nevýhod, například dochází ke ztrátám cca 10 % energie akumulované v těkavé hořlavině, která se uvolňuje při zahřátí nad 300 °C (Stupavský, 2012). S tím souvisí klesající výtěžnost biouhlu, která byla zjištěna v souvislosti se zvyšující se teplotou a rychlostí ohřevu.

Zájem o využití torifikace biomasy jako metody úpravy materiálu roste (McCaffrey et al. 2021).

Různorodá škála vlastností materiálu z torifikované biomasy závisí na jeho fyzikálně-chemických vlastnostech, které závisí na podmínkách tepelného zpracování (tj. teplotě a době zdržení) a vlastnostech původní suroviny. Podrobné informace o tepelných procesech jsou tedy důležité pro optimalizaci vlastností materiálu z biomasy pro konkrétní použití (Mohd Fuad, Hasan, Ani 2019; Yan et al. 2021). Produkty torifikace jsou však závislé na době zdržení, ale hlavně na použité teplotě, a proto jsou studie torifikace klíčové pro stanovení optimální výroby (Chiou et al. 2016).

Torifikace mění fyzikální vlastnosti materiálu tím, že narušuje pevnost vláken a usnadňuje rozměňování, torifikovaný materiál se tak může dále zpracovávat na pelety nebo brikety určené k energetickému využití (Gendek et al. 2018). Pelety a brikety vyrobené z torifikované biomasy pak mohou být spolu spalovány s konvenčním palivem v uhelných elektrárnách (Phanphanich, Mani 2011; Kelkar et al. 2015). Torifikace biomasy proto může umožnit využití udržitelných paliv bez nutnosti dalších zařízení v uhelných elektrárnách vedoucí ke snížení spotřeby uhlí (Bridgeman et al. 2010).

Uslu uvedl, že torifikace má vyšší účinnost procesu než peletizace a pyrolýza a je důležitým krokem zpracování, který má potenciál snížit náklady na bioenergii a biopaliva (Uslu, Faaij, Bergman 2008).

V případě energetických produktů může torifikace hrát významnou roli při snižování nákladů na přepravu a skladování biomasy potřebné pro velkokapacitní bio rafinerie tím, že zlepšuje vlastnosti před vlastní přepravou (Medic et al. 2012).

Obecně platí, že některé důležité fyzikálně-chemické vlastnosti biouhlu závisí na surovinách pro přípravu biouhlu, včetně obsahu minerálních látek (Ellis et al. 2015), organického uhlíku (Qin et al. 2017) a vlastností povrchových funkčních skupin (Ma et al. 2017).

2.8.2. Torifikace dřevní hmoty

Při torifikaci dřevní hmoty dochází k rozpadu dřevní celulózy, hemicelulózy a ligninu. Nejméně odolné vůči torifikaci jsou dřevní polyózy – hemicelulózy, které se rozkládají při teplotách v rozmezí 170-240 °C. Nejdolnější složkou dřeva je lignin. Aktivní rozklad ligninu probíhá při teplotách 300-400 °C.

Vyšší výhřevnost torifikované dřevní hmoty je způsobena snižujícím se obsahem kyslíku. V původním stavu je poměr kyslíku k uhlíku (O/C) v dřevní hmotě větší než 1. Procesem torifikace se tento poměr snižuje pod 1 a se zvyšující se teplotou torifikace lze dosáhnout poměru O/C menšího než 0,4. Výsledkem je zvýšení výhřevnosti ze 17 MJ.kg⁻¹ u surové dřevní hmoty na 27 MJ.kg⁻¹ u torifikované dřevní hmoty (Wilk et al. 2016).

Se snižujícím se obsahem kyslíku v torifikovaném materiálu se zároveň snižuje množství vodíku. V důsledku poklesu obsahu kyslíku a vodíku neboli poklesu hydroxylových skupin, vykazuje výsledný materiál hydrofobní chování (Bates, Ghoniem 2012).

Přidáním torifikované dřevní hmoty do výroby agropelet na bázi bylin je možné zlepšit mechanické a spalovací vlastnosti finálních biopaliv (Souček et al. 2019).

2.8.3. Torifikace kávy, čaje a ořechů

Káva je materiálem vhodným k úpravě torifikací, výsledky prvkové analýzy ukázaly pozitivní vliv torifikace k úpravě kávy (Tamelová, Malat'ák, Velebil 2018; Jutakradsada et al. 2016). Káva lze torifikací snadno přeměnit na vysoce hodnotný palivový produkt díky vysoké koncentraci cukrů, vláken, bílkovin a sloučenin, jako jsou mastné kyseliny,

aldehydy, ketony, alkoholy, hemicelulóza, celulóza nebo lignin (Lee et al. 2021; Rajesh Banu et al. 2020)

Zvyšování účinnosti čajového odpadu na biopalivo pomocí torifikace je stále oblastí k výzkumu. Dosud bylo provedeno jen několik podobných výzkumů, Cai zkoumal tepelné chování čajových listů a čajového odpadu pomocí TGA v inertní atmosféře s pozitivním výsledkem (Cai et al. 2018) a Liu ukázal, že pelety z torifikované biomasy mají vyšší obsah fixního uhlíku, vyšší hodnoty výhřevnosti a zvýšenou hmotnostní hustotu ve srovnání s peletami ze surové biomasy (Liu et al. 2016).

Emisním faktorem se zabývá také řada článků. Například u čaje většina výzkumů potvrdila podobné výsledky, které naznačují, že hlavním emisním faktorem čaje je konečná příprava horkého nápoje, vařením vody. Z výzkumu vyplývá, že celkový emisní faktor čaje se rovná $12,45 \text{ CO}_2.\text{kg}^{-1}$ suchého čaje u velkovýroby a $12,08 \text{ CO}_2.\text{kg}^{-1}$ u malovýroby (Azapagic et al. 2016; Xu, Li, Jiang 2019). Dle studie Cichorowského se uhlíková stopa 1 kg čaje Darjeeling pohybuje mezi 7,1 a $25,3 \text{ CO}_2.\text{kg}^{-1}$ v závislosti na způsobu pěstování, použitých zdrojích energie a způsobu přepravy. Potvrdil také dominanci fáze použití včetně vaření vody, která má 51 % podíl na celkovém CO_2 (Cichorowski et al. 2015). Podle Lianga jsou celkové emise rozděleny na spotřebu energie při zpracování čaje (41 %), výrobu hnojiv (31,6 %) a emise půdy (26,7 %), což vede k průměrné hodnotě $10,8 \text{ CO}_2.\text{kg}^{-1}$ zpracovaného čaje (Liang et al. 2021).

Výzkumů torifikace ořechových skořápek proběhlo již několik, především v USA. Ořechové skořápky vykazují při torifikaci vysoké výtěžky pevné látky a energie (Barskov et al. 2019) při zachování nízkého obsahu síry, což je činí zajímavými pro americké elektrárny (Chiou et al. 2016).

V oblasti kokosových ořechů převládá pozitivní vliv torifikace, která při teplotě $275 \text{ }^\circ\text{C}$ a době setrvání 30 min výrazně zlepší výhřevnost kokosových skořápek (Espina, Barroca, Abundo 2022). Ze studie vyplývá, že torifikací kokosových skořápek při teplotě $275 \text{ }^\circ\text{C}$ a době setrvání 30 min se dosáhlo optimální výhřevnosti $34,37 \text{ MJ.kg}^{-1}$ při obsahu vlhkosti 2,00 %, obsahu popela 0,60 %, těkavé látky 0,66 % a fixovaného uhlíku 96,70 %. Toto zlepšení znamenalo zvýšení výhřevnosti o 11,64 % oproti výhřevnosti surových kokosových skořápek na úrovni $30,79 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (Espina, Barroca, Abundo 2022).

Arnsfeld zkoumal torifikaci mandlových skořápek a porovnával jejich porézní strukturu s torifikovanou dřevní hmotou. Zjistil, že skořápky mají menší póry než dřevní hmota a ty zůstaly po torifikaci neporušené (Arnsfeld, Senk, Gudenau 2014). Tato studie

naznačila, že torifikaci lze úspěšně použít k přeměně surových mandlových skořápek na zdroj paliva s vysokou energetickou hustotou a nízkým obsahem vlhkosti.

Torifikace mandlových skořápek se ukázala jako účinná metoda pro zlepšení jejich výhřevnosti odstraněním vlhkosti a těkavých složek (Chiou et al. 2015) mohla by být životaschopnou alternativou pro jejich současné primární využití jako podestýlky pro hospodářská zvířata a abraziva pro čištění. Torifikované mandlové skořápky lze použít jako náhradu konvenčního uhlí nebo je lze dále zpracovat pyrolýzou či zplyňováním (Magdziarz, Wilk, Straka 2017).

U studie vlašských ořechů bylo prokázáno, že torifikace v kombinaci s pyrolýzou by mohla účinně zvýšit výtěžnost biouhlu získaného ze skořápek vlašských ořechů (Chiou et al. 2016). Při torifikaci výlisků a skořápek ořechů měla teplota větší vliv na hmotnostní a energetické výtěžky než čas (Chiou et al. 2015).

2.9. Využití biouhlu

Biouhel je trvale uznáván jako multifunkční materiál. Podle různých povrchových vlastností, struktury a složení biouhlu lze modifikovaný biouhel široce využít při sekvestraci skleníkových plynů (Oldfield et al. 2018), jako levné adsorbenty (Yu et al. 2017), půdní zlepšovadlo (Wang et al. 2019), nosič katalyzátorů (Tao et al. 2015).

V současné době se biouhel získává především ze zemědělských a lesnických odpadů (Wang, Yin, Liu 2014; Ma et al. 2019), pevných odpadů (Fang et al. 2015; Gunasee et al. 2016; Peng et al. 2016) a některých organických látek (Ding et al. 2018; Fan et al. 2017), jako jsou zbytky dřeva, skořápky vlašských ořechů, rýžové slupky, sláma.

Většina studií zjistila, že aplikace biouhlu zlepšuje úrodnost půdy, zvyšuje výnosy plodin, snižuje emise skleníkových plynů a zvyšuje zásoby uhlíku v půdě (Rawat, Saxena, Sanwal 2019; Lehmann, Joseph 2015). Dále bylo prokázáno, že biouhel lze použít jako půdní přísadu, protože jeho struktura umožňuje vázat a zadržovat vodu v půdě. Umožňuje také lepší provzdušnění a podporuje mikrobiální aktivitu a přenos živin (Cruz et al. 2015; Dragone et al. 2020). Díky svým vlastnostem a stabilní organické formě může být biouhel atraktivním materiálem v oblasti zemědělství. Biouhel zvyšuje schopnost půdy nebo substrátu zadržovat vodu. Odlehčuje půdu, zvyšuje pH, zvyšuje mikrobiální aktivitu a v místě aplikace zvyšuje využití prvků získaných z hnojiv. Jejich zadržováním a postupným uvolňováním také snižuje jejich únik do podzemních vod (Rondon et al. 2007). Biouhel je vysoce stabilní vůči rozkladu, takže může zůstat v půdě delší dobu

a postupně uvolňovat látky do půdy. Fyzikální a chemické vlastnosti biouhlu však závisí na podmínkách torifikace, jako je teplota a typ vstupní suroviny (Rondon et al. 2007). Doporučená aplikační dávka pro jakékoliv ošetření půdy by měla vycházet z rozsáhlých laboratorních, skleníkových a polních experimentů. Kromě toho se vlastnosti biouhlu mohou lišit v závislosti na vstupní surovině, jako je (např. pH, obsah popela, vlhkost, obsah živin). To také ovlivňuje aplikační dávku. Několik studií uvádí pozitivní účinky aplikace biouhlu na výnosy plodin v rozmezí 5-50 tun na hektar při vhodném hospodaření s živinami (Spokas, Novak, Venterea 2012).

Fyzikálně-chemické vlastnosti biouhlu, používaného jako obnovitelný zdroj energie, jsou zásadní pro optimalizaci jeho výrobního využití (Xie et al. 2015). Obsah vlhkosti a popela jsou důležité parametry kvality biouhlu, jejichž přesné stanovení je nezbytné (Leoni et al. 2021), stejně jako přesné stanovení výhřevnosti (Hnilička et al. 2020). Podíl jednotlivých prvků (CHNS) má zásadní vliv na tepelný výkon spalovacího zařízení (Malaták et al. 2020), ale také na výsledné emisní koncentrace při spalování paliv z biouhlu (Malaták et al. 2020).

Biouhel pro aplikaci do půdy musí splňovat přesná kritéria, aby byl bezpečný. Podle Evropského certifikátu pro biouhel nesmí poměr H/C, který popisuje stabilitu látky, překročit hodnotu 0,7. A poměr O/C musí být menší než 0,4. Kromě toho se sleduje přítomnost nutričně významných prvků (N, P, Mg, K, Ca) a těžkých kovů (Pb, Cd, Cu, Ni, Hg, Zn, Cr, As). Obsah polycyklických aromatických uhlovodíků PAH nesmí překročit stanovené limity (Schmidt, Bucheli, Kammann 2012).

3. Cíle disertační práce

Cílem této disertační práce je posouzení vybraných obnovitelných zdrojů energie s ohledem na jejich vliv na prostředí. Proto jsou zvoleny dílčí cíle, a to zhodnocení a potvrzení možnosti využití obnovitelných materiálů a odpadů jako alternativního paliva v domácnostech a dále zhodnocení dopadu torifikace těchto materiálů pro následné použití v průmyslu. Dále mezi dílčí cíle, nezbytnými k dosažení hlavního cíle, patří:

- i) optimální výběr vzorku paliva,
- ii) stanovení základních metodik výzkumu, tj. elementárního složení, podílu vlhkosti a popela, určení spalného tepla a výhřevnosti, stechiometrické vlastnosti paliva,
- iii) zhodnocení parametrů výsledku a následné porovnání s literaturou obsahující již proběhlý výzkum v daných či podobných oblastech.

Z obnovitelných materiálů se bude posuzovat dřevní štěpka, která zároveň poslouží jako podkladový materiál pro porovnání výzkumu odpadových, méně obvyklých materiálů. Z odpadových materiálů bude analyzována kávová sedlina, čajový odpad, skořápky ořechů a dále ječmen, jehož primární využití je v potravinářství.

4. Hypotézy disertační práce

Z historického pohledu žijeme v relativně bohatém světě, ve kterém se už nestačí soustředit jen na přežití z pohledu jednotlivce, ale zároveň je potřeba se soustředit na udržitelný vývoj s důrazem na přežití celého lidstva. Udržitelný vývoj je takový, který není na úkor přírodních zdrojů a může tak trvat věčně. Některé z oblastí, které se udržitelného vývoje přímo dotýkají jsou nové zdroje energie, které jsou obnovitelné v krátkém časovém úseku (v maximálně jednotkách let) a dále recyklace již vyprodukovaných, vypěstovaných či vyrobených statků, které již prošly primárním využitím a hledají nové využití namísto skládkování, či jiného zatížení planety.

Některé materiály není možné recyklovat okamžitě, či je to u nich žádoucí, aby byly před dalším použitím tepelně upraveny.

Součástí této disertační práce jsou hypotézy, které naplňují cíle práce:

1. Termochemické vlastnosti skořápek ořechů, zbytků z přípravy kávy a čaje je možné použít jako náhradu za dřevní hmotu určené pro domácnosti s ohledem na jejich výhřevnost a emisní koncentrace
2. Dynamika spalování v difúzních oblastech pro ječmen selepší po vytvoření směsi s odpadem z dřevozpracujícího průmyslu a tuto směs je možné použít jako alternativní palivo pro menší zdroje vytápění.
3. Úprava odpadních materiálů jako jsou ořechové skořápky, kávová sedlina a čajový odpad v oblastech nízkoteplotní pyrolýzylepší poměr hořlavé a nehořlavé části paliva a následně stechiometrické vlastnosti pro jejich energetické použití.

5. Metodika práce

Výzkum proběhl v prostorách laboratoří Technické fakulty ČZU v Praze. Vlastnoručně nasbírané materiály byly analyzovány na palivářské vlastnosti. Byla provedena prvková analýza, analýza vlhkosti a množství popele v materiálu a nakonec naměřeno spalné teplo.

5.1. Použité materiály

Pro účely výzkumu byly vybrány následující materiály.

5.1.1. Smrková dřevní hmota (*Picea abies*)

Vzorek bílé dřevní štěpky a pilin smrkového dřeva pocházející ze školního závodu v Kostelci nad Černými lesy. Vzorek byl odebrán při zpracování smrkových kmenů během letní sezóny v roce 2020. Analýza dřevní štěpky a pilin vykazala stejné hodnoty, proto byl materiál pro účely podrobnějšího výzkumu namíchán. Materiál byl po dovezení rozprostřen v laboratořích na dva týdny, aby se přirozeně prosušil. Směs smrkové štěpky a pilin byla později torifikována při teplotách 250 °C a 280 °C.

5.1.2. Ječmen (*Hordeum vulgare*)

Ječmen (*Hordeum vulgare*) byl původně určen pro pivovar Suchdolský Jeník. Z důvodu pandemie Covid, ale nebyl nakonec pro nízkou výtoč piva v roce 2020 využit a mohl posloužit vědě.

Ječmen patří mezi nejstarší zemědělské plodiny, který do Evropy přivezly stěhovavé národy z jihozápadní Asie v období 3000 let před Kristem. V oblasti přímé konzumace byl ječmen později nahrazen pšenicí. Světová roční produkce ječmene je zhruba 150 mil. tun, čímž je čtvrtou nejrozšířenější potravinou. V České republice je ječmen s roční produkcí ve výši 600 tis. tun, druhou nejrozšířenější potravinou (ČSÚ 2020). Základním využitím ječmene je výroba sladu pro pivovarnictví a jako přísada do jídel v podobě krup.

5.1.3. Kávová sedlina

Kávová sedlina (spent coffee ground) byla vybrána jako jeden z odpadních materiálů, který by mohl najít nové využití, ať už v domácnosti či v průmyslu. Konkrétně byla vybrána směs *Coffea arabica*, jedna ze 120 druhů kávy, která pokrývá 75 % světové produkce. Botanický rodový a druhový název *Coffea arabica*, psaný také jako *C. arabica*,

pochází z lesů Etiopie a Jižního Súdánu. *C. arabica* se pak rozšířila po celém světě (Coffee Plants of the World 2021).

Celkové množství 3 kg kávové sedliny bylo nasbíráno jednou domácností v průběhu 4 měsíců. Káva se sušila přirozeně na slunci a dosáhla hmotnostního podílu vlhkosti 8,22 %. Kávová sedlina byla později torifikována při teplotách 250 °C, 300 °C, 350 °C, 450 °C a 550 °C.

5.1.4. Čajový odpad

Čajový odpad je v rámci tohoto výzkumu posuzován jako zbytek ze zpracování čajových nápojů. Konkrétně se jedná o směs vícero druhů čajovníku (*Camellia sinensis* nebo *Thea sinensis*), která byla sbírána v jedné domácnosti po dobu 4 měsíců a přirozeně sušena na slunci. K přípravě čaje se obvykle používají listy a listové pupeny.

Čajový odpad byl roztríděn podle velikosti částic do tří skupin: 0-3 mm, 3-6 mm a 6-10 mm a torifikován při stejných teplotách jako kávová sedlina, tj. 250 °C, 300 °C, 350 °C, 450 °C a 550 °C.

5.1.5. Skořápky ořechů

Vlašský ořech je plod stromu Ořešák královský (*Juglans regia L.*), a skládá se z požitelného jádra a pevné dřevnaté skořápky. Dle archeologických nálezů z Francie je vlašský ořech znám již od doby neolitu. Sběrná sezóna ořechů je od srpna do září.

Pistácie je plod stromu Řečík pistáciový (*Pistacia vera*) z čeledi ledvinovnickovité. Skládá se také z požitelného jádra a pevné skořápky. Původní oblast rozšíření je ze střední Asie a Blízkého východu, dnešními největšími producenty jsou Írán, USA, Turecko a Čína.

Arašíd je plod rostliny Podzemnice olejné (*Arachis hypogaea*) z čeledi bobovitých. Na rozdíl od ostatních zkoumaných ořechů je arašíd luštěninou. Arašíd pochází z Jižní Ameriky z před cca šesti tisíci lety.

5.2. Metody měření

Úprava a měření chemicko-fyzikálních vzorků bylo provedeno na těchto přístrojích:

5.2.1. Horkovzdušná sušička Memmert UF30

Všechny zkoumané materiály byly po odběru sušeny ve volném prostoru a poté dosušeny v horkovzdušné sušičce UF30 od výrobce Memmert do konstantní hmotnosti při teplotě 105 °C.

Memmert UF30 je sušička se zabudovaným ventilátorem s nuceným prouděním vzduchu, který napomáhá rovnoměrnějšímu rozložení teplot a urychluje sušení materiálu. Sušička je vybavena výfukovou klapkou, která v případě sušení vlhkého materiálu pomáhá s odvodem vlhkého vzduchu. V sušičce lze nastavit teplotu v rozsahu od 20 °C do 300 °C. Komora sušičky je z nerezové oceli a dveře se otevírají pomocí svislého madla. Maximální objem sušičky je 32 l.

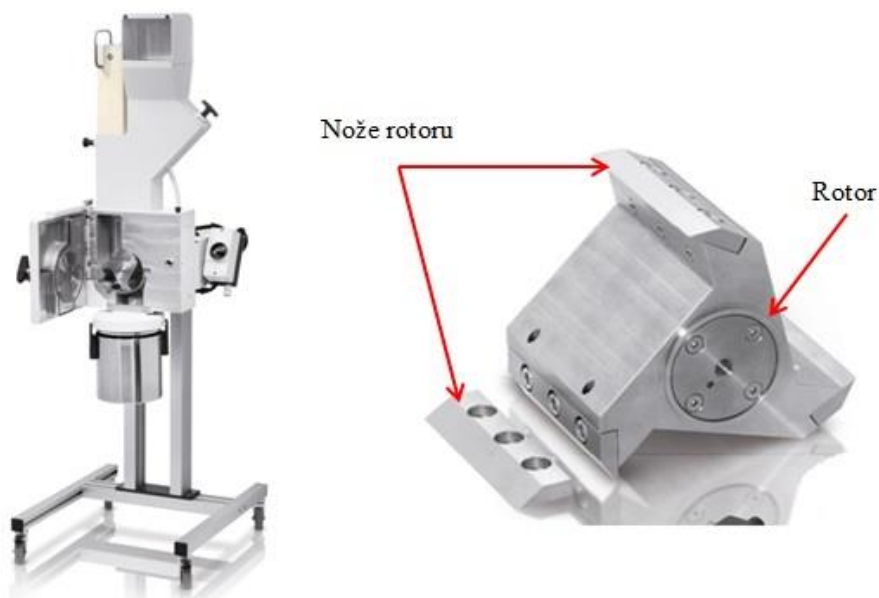


Obrázek 4: Horkovzdušná sušička Memmert UF30 (zdroj: webshop.ats-net.com)

5.2.2. Střížný mlýn Retsch SM 100

Všechny materiály byly po usušení namlety mlýnem Retsch SM 100, aby se dosáhlo konzistence v měření vzorků. Materiál byl namlet na jemnost částice pod 1 mm.

Střížný mlýn Retsch SM 100 je vhodný pro mletí měkkých až středně tvrdých materiálů a umožňuje dosažení jemnosti částic od 20 mm do 0,25 mm. Mlýn dosahuje rychlosti otáček rotoru až 25 s⁻¹.



Obrázek 5: Střížný mlýn Retsch SM 100 (zdroj: verkon.cz)

5.2.3. Laboratorní váha Sartorius SP124 S

Všechny vzorky byly před analýzou zváženy na laboratorní váze Sartorius SP124 S. Ta je napřímo propojena s elementárním analyzátozem LECO CHN628 + S a kalorimetrem LECO AC-600 pro jednodušší přenášení dat. Váha váží s přesností na 0,1 mg, přičemž minimální navážka je 120 mg. Po stranách jsou ochranné kryty bránící proudění vzduchu a zkreslení výsledků.



Obrázek 6: Laboratorní váha Sartorius SP124 S (zdroj: vlastní foto)

5.2.4. Poloautomatický kalorimetr LECO AC-600

Použitím Poloautomatického kalorimetru LECO AC-600 bylo naměřeno spalné teplo materiálu, které je jedním z nejdůležitějších kvalitativních parametrů tuhých i kapalných paliv. Nejprve byl vybraný vzorek ručně slisován do tvaru tablety a poté zvážen na laboratorní váze.

Tableta z daného vzorku byla vložena v kovovém kelímku do kovové bomby, která byla natlakována na úroveň 3MPa. který je na spodní části víka bomby byla uvázána zapalovací nit. Vzorek byl v bombě zapálen použitím zapalovací nitě, která se musí dotýkat tablety.

Během analýzy byla bomba ponořena do vodní lázně. Teplota vodní lázně je velmi důsledně monitorována elektrickým teploměrem s rozlišením 0,0001 °C.

Spalné teplo je stanoveno spálením vzorku v řízeném prostředí kde uvolněné teplo je úměrné spalnému teplu analyzovaného vzorku. Pro každý vzorek se měření nejméně třikrát opakovalo, přičemž čas každého pokusu byl 9 minut. Čistá výhřevnost byla stanovena výpočtem z výsledků elementární a proximální analýzy jednotlivých vzorků.



Obrázek 7: Kalorimetr AC600 (zdroj: vlastní foto)

5.2.5. Elementární analyzátor CHN628 + S

S pomocí elementárního analyzátoru CHN628+S byla provedena prvková analýza která je nutná ke stanovení hmotnostní podílu uhlíku, vodíku, kyslíku, síry a dusíku. Prvková analýza byla použita pro posouzení vhodnosti využití organických materiálů ve zpracovatelském zařízení nebo při vyhodnocení jakosti vzorků. Přístroj analyzuje vzorek pomocí spalování v čase 4,5 minuty. Analyzátor je napojen na externí počítač, ve kterém je nainstalován výrobcem daný software, který výsledky ukládá a dále zpracovává.



Obrázek 8: Analyzátor CHN628 (zdroj: vlastní foto)

5.2.6. Analyzátor LECO TGA (Termogravimetrický analyzátor) - 701

Analýza váhových úbytků měřených materiálů v závislosti na narůstající teplotě v řízeném prostředí byla provedena na termogravimetrickém analyzátoru LECO TGA-701. Dále byla určena vlhkost a podíl popele v materiálu. Termogravimetrický analyzátor TGA-701 se používá ke stanovení složení organických a anorganických materiálů, měří úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě v řízené atmosféře vzduchu, obohaceného dusíkem. Analyzátor TGA se dá využít i k simulaci torifikace materiálu

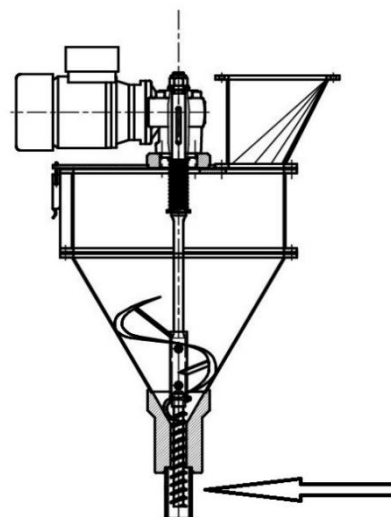
v malém množství, v jednotkách gramů. Výhodou této torifikace je úprava materiálu v plně kontrolovaném a řízeném prostředí.



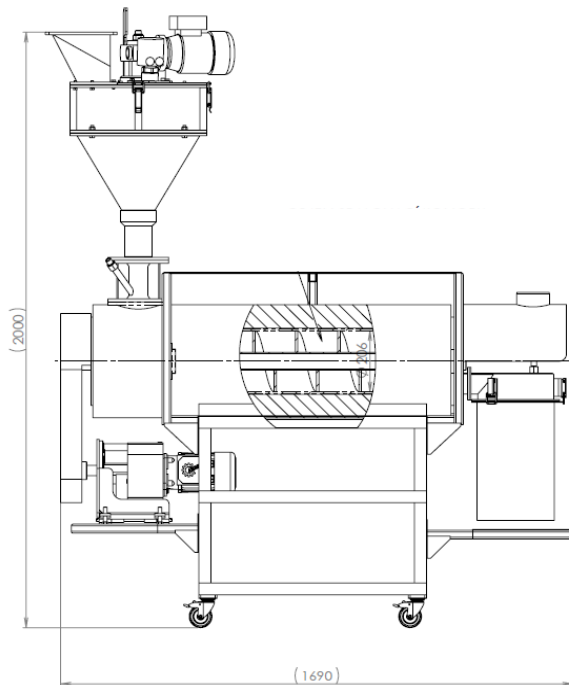
Obrázek 9: Termogravimetrický analyzátor TGA701 (zdroj: vlastní foto)

5.2.7. Torifikační jednotka

V případě potřeby torifikace většího množství materiálu, například dřevní hmoty, využívá se torifikační jednotka vyrobená z elektrické válcové pece. Proces torifikace probíhá při nastavené teplotě s celkovou dobou 1 hodiny v peci. Aby se zabránilo samovznícení, vypouští se do pece inertní dusík z tlakové láhve ($4\text{-}5\text{lit.min}^{-1}$). Materiál vstupuje do torifikační jednotky přes násypku, šnekovým dávkovačem je dávkován na samohybný pásový dopravník, kterým je materiál dopraven do torifikační pece. Vlhkost materiálu při vstupu je 8 % hm, kontrolovaná sušicí vahou Ohaus MB-25. Pec je vytápěna odporovými elektrickými topnými tělesy a izolována hliníkovou fólií. Plášť pece obsahuje



Obrázek 10: Šnekový dávkovač se zásobníkem



Obrázek 11: Torifikační jednotka

teplotní čidla, které slouží k regulaci provozní teploty, která se obvykle pohybuje v rozmezí 250 °C až 350 °C. Celková doba zdržení materiálu v peci je 1 hodina, při dané teplotě je doba kratší a to 40-45 minut. Přímý pohon pomocí elektromotoru na hřídeli podavače musel být nahrazen z důvodu dlouhé doby setrvání materiálu v tepelné komoře. K volbě pohonu byl použit řetězový pohon a vložena planetová převodovka. Skladovací nádoba je místem, kde se látka vypouští.

5.3. Vlastnosti a složení materiálu

Složení materiálu je důležitým mezníkem pro hodnocení využitelnosti materiálu ke spalování. Do složení materiálu se počítá podíl vlhkosti W (% hm.), obsah popela A (% hm.) a podíl jednotlivých prvků, tj. uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku a síry (% hm.). Zároveň se určuje podíl prchavé a neprchavé hořlaviny v palivu. Materiál můžeme také definovat dle složení, jako je lignin, celulóza, hemicelulózy, uhlohydráty a obsah tuku.

Dle Wang, celulóza, hemicelulóza a lignin jsou tři hlavní složky biomasy. Obecně může obsah celulózy dosahovat 40-60 %, hemicelulózy 15-30 % a ligninu 10-25 % v závislosti na druhu biomasy (Wang, Dai, Yang, et al. 2017). Tyto složky jsou výrazně ovlivněny torifikací a kvalitou dané biomasy (Zhao et al. 2017). Bylo zjištěno, že hemicelulóza má vyšší výtěžek CO_2 , celulóza vyšší výtěžek, CO a lignin vyšší výtěžek H_2 a CH_4 (Yang et al. 2007).

Dalším velmi důležitým faktorem paliva je hodnota spalného tepla a výhřevnosti. Při spalování se hořlavé látky paliva slučují s kyslíkem a vznikají produkty spalování, nazývané spaliny. Tento proces je doprovázen uvolňováním tepla, které se u tuhých a kapalných paliv vztahuje na hmotnostní jednotku $kJ \cdot kg^{-1}$ (za normálních podmínek:

$t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 101,3\text{ kPa}$, označení m^3_{N}). V technické praxi se uvolněné teplo vyjadřuje jako spalné teplo Q_s nebo jako výhřevnost Q_i paliva (Malat'ák & Vaculík, 2008).

Výhřevnost materiálu je silně ovlivněna obsahem vody, tj. vlhkostí, více než druhem biomasy. Například u suché stébelné hmoty je výhřevnost asi pouze o 6 % nižší než u sušiny dřevin. Pro výhřevnost sušiny je důležité její látkové složení, neboť zatímco výhřevnost ligninu je kolem $28,8\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, celulóza disponuje výhřevností pouze $17,3\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Materiál s vysokým obsahem ligninu tak má zpravidla vyšší výhřevnost než materiál obsahující převážně celulózu (Tamelová, disertace). Výhřevnost tuhých biopaliv je také ekonomickým parametrem (Jevič et al., 2008). Výhřevnost biomasy se pohybuje v širokém rozmezí $8\text{--}25\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, což je nižší hodnota v porovnání s výhřevností uhlí ($25\text{--}30\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), naftou ($40\text{--}45\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) či zemním plynem ($50\text{--}55\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Franco & Giannini, 2005).

Závislost mezi spalným teplem Q_s a výhřevností Q_i lze vyjádřit vztahem dle ČSN 441352:

$$Q_i = Q_s - (0,02442 \cdot 1000) \cdot (W + 8,94 \cdot H) \quad (\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}_{\text{N}}); \quad (1.1)$$

kde: W je obsah vody v analytickém vzorku (%);
 8,94 koeficient pro přepočtení vodíku na vodu;
 H obsah vodíku v analytickém vzorku (%);
 0,02442 hodnota, která odpovídá energii spotřebované na ohřev a vytápění 1 % vody při teplotě 25°C .

Přepočtení výhřevnosti Q_i při obsahu veškeré vody (W_t) na jiný obsah veškeré vody (W_{ii}) se provádí podle vzorce:

$$Q_{in} = \frac{100 - (W_{ii})}{100 - (W_t)} \cdot (Q_i + 0,02442 \cdot (W_t)) - 0,02442 \cdot (W_{ii}) \quad (\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}_{\text{N}}); \quad (1.2)$$

kde: (W_{ii}) je obsah veškeré vody, na kterou se provádí přepočtení (%);
 (W_t) obsah veškeré vody v původním vzorku (%);
 Q_i výhřevnost původního vzorku ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}_{\text{N}}$).

Spalné teplo lze nejpřesněji určit měřením v kalorimetrech (ČSN 44 1352). Spalné teplo a výhřevnost je v technické praxi určeno výpočtem, k čemuž se využívá výsledků celkové (elementární) nebo technické (immediatní) analýzy paliva (Malat'ák & Vaculík, 2008).

5.4. Výpočet stechiometrie

Všechny zkoumané vzorky byly podrobeny stechiometrické analýze, která se používá k výpočtu spalovacích charakteristik materiálu. Stechiometrické výpočty byly upraveny pro běžné podmínky (teplotu $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlak $p = 101,325\text{ kPa}$) a byly počítány s hodnotami reálných molárních objemů plynů. Referenční obsah kyslíku byl stanoven na 10 % objemu a součinitel přebytku vzduchu nastaven v koeficientu 1,91 v souladu s technickými kritérii pro spalování biomasy dle zákona o ochraně ovzduší (MŽP 2018).

Vztahy použité pro stechiometrické výpočty:

Jako okysličovadlo se uvažuje suchý vzduch o zjednodušeném složení:

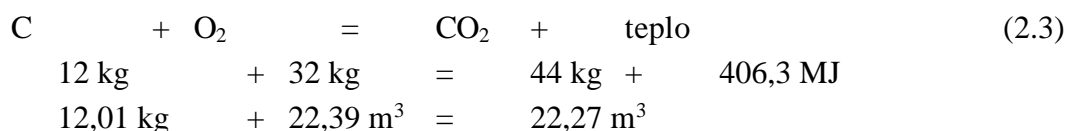
- a) Objemově: 21 % O_2 , 78,05 % N_2 . Z tohoto složení lze vypočítat poměr kyslíku, dusíku a vzduchu ze vztahu:

$$\text{O}_2 : \text{N}_2 : \text{vzduch} = \frac{21}{21} : \frac{78,05}{21} : \frac{100}{21} = 1 : 3,716 : 4,76 \quad (2.1)$$

- b) Hmotnostně: 23,2 % O_2 , 75,47 % N_2 . Obdobně určíme poměr vztahem:

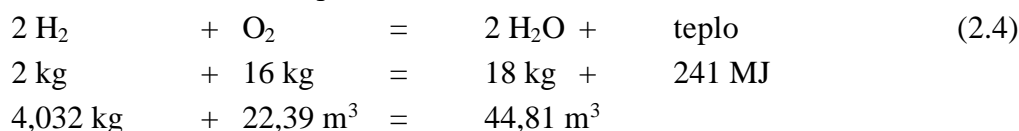
$$\text{O}_2 : \text{N}_2 : \text{vzduch} = \frac{23,2}{23,2} : \frac{75,47}{23,2} : \frac{100}{23,2} = 1 : 3,253 : 4,31 \quad (2.2)$$

Oxidační reakce při spalování:



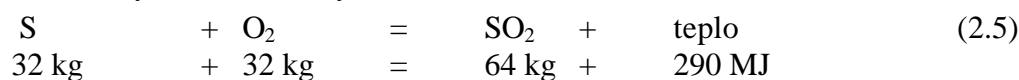
Výhřevnost 1 kg čistého uhlíku je $33,85\text{ MJ.kg}^{-1}$.

Spalování vodíku na vodní páru:



Výhřevnost 1 kg vodíku je $120,5\text{ MJ.kg}^{-1}$.

Spalování síry na oxid siřičitý:



$$32,06 \text{ kg} + 22,39 \text{ m}^3 = 21,89 \text{ m}^3$$

Výhřevnost 1 kg síry je $9,0625 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Pro převod ostatních prvků a vlhkosti (vody) do plynné fáze platí:

Pro dusík:

$$\begin{aligned} 2 \text{ N} &= \text{N}_2 & (2.6) \\ 28,013 \text{ kg} &= 28,013 \text{ kg} \\ 28,013 \text{ kg} &= 22,39 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Pro kyslík:

$$\begin{aligned} 2 \text{ O} &= \text{O}_2 & (2.7) \\ 31,999 \text{ kg} &= 31,999 \text{ kg} \\ 31,999 \text{ kg} &= 22,39 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Pro vlhkost platí:

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O}_{\text{kap}} &= \text{H}_2\text{O}_{\text{pára}} & (2.8) \\ 18,015 \text{ kg} &= 18,015 \text{ kg} \\ 18,015 \text{ kg} &= 22,41 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Všechny objemy a hmotnosti spalovacího vzduchu a spalin v rovnicích jsou dány za takzvaných normálních podmínek, tj. při teplotě $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $p = 101,325 \text{ kPa}$ (Obroučka 2000).

Hmotnostní spalování

K následujícím výpočtům se použily rovnice (2.2), (2.3), (2.8).

Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování:

$$O_{\min} = \frac{32}{12} \cdot C + \frac{32}{4} \cdot H + \frac{32}{32} \cdot S - \frac{32}{32} \cdot O \quad (\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}), \quad (2.9)$$

Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{\min} = O_{\min} \cdot \frac{100}{23,2} \quad (\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}), \quad (2.10)$$

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{\text{skut}} = O_{\min} \cdot \frac{100}{23,2} \cdot n \quad (\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}), \quad (2.11)$$

Teoretické hmotnostní množství suchých spalin:

$$m_{sp_{min}}^s = \frac{44}{12} \cdot C + \frac{64}{32} \cdot S + N + 0,75474 \cdot L_{min} \quad (\text{kg.kg}^{-1}), \quad (2.12)$$

kde: C, H, O, S, N, W jsou poměrná množství uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku a veškeré vody v původním palivu (kg.kg^{-1});
n součinitel přebytku vzduchu (-).

Objemové spalování (hodnoty reálných molárních objemů plynů)

K výpočtům jsou použity tyto rovnice (2.1), (2.3) – (2.8). V praxi se pro přepočty používají hodnoty reálných molárních objemů plynů.

Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování:

$$O_{min} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C + \frac{22,39}{4,032} \cdot H + \frac{22,39}{32,06} \cdot S - \frac{22,39}{31,99} \cdot O \quad (\text{m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}), \quad (2.13)$$

Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{min} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} \quad (\text{m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}), \quad (2.14)$$

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{skut} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} \cdot n \quad (\text{m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}), \quad (2.15)$$

Teoretické objemové množství suchých spalin:

$$v_{sp_{min}}^s = \frac{22,27}{12,01} \cdot C + \frac{21,89}{32,06} \cdot S + \frac{22,40}{28,013} \cdot N + 0,7805 \cdot L_{min} \quad (\text{m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}), \quad (2.16)$$

kde: C, H, O, S, N, W jsou poměrná množství uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku a veškeré vody v původním palivu (kg.kg^{-1});
n součinitel přebytku vzduchu

Dále byl stanoven hmotnostní tok paliva přiváděného do spalovacího zařízení z hlediska energetického využití kde účinnost spalovacího zařízení byla stanovena na úrovni 90 % a jmenovitý tepelný výkon byl odstupňován od 20 kW do 260 kW.

6. Výsledky a diskuze

Ve výsledcích se postupně seznámíme s:

- I. Prvkovou analýzou a výhřevností původního usušeného materiálu;
- II. Prvkovou analýzou a výhřevností materiálu upraveného metodou torifikace;
- III. Stechiometrickou analýzou všechno zkoumaných materiálů

6.1. Analýza původního materiálu

6.1.1. Prvková analýza

Prvková analýza je základním kamenem výzkumu struktury materiálu. Ze všech zkoumaných materiálů lze vyčíst dominanci uhlíku v kávové sedlině ve výši 50,26 %. Tento výsledek je v souladu s Fermosem a Maškem (Fermoso, Mašek 2018), kteří naměřili podíl uhlíku na úrovni 53,90 % a také s Maysonem (Mayson, Williams 2021), který naměřil podíl uhlíku u kávové sedliny na úrovni 53,32 %.

Druhý nejvyšší podíl uhlíku (49,63 %) byl naměřen u skořápek arašídového ořechu. Nad 47 % uhlíku má dále dřevní štěpka (47,83 %) a čajový odpad (47,01 %), blízko k 45 % uhlíku mají skořápky vlašského ořechu (44,50 %) a skořápky pistácií (45,45 %). Nejmenší podílu uhlíku ze zkoumaných materiálů má ječmen s 41,73 %. Uhlík je důležitým činitelem pro výslednou hodnotu výhřevnosti, kávová sedlina a skořápky arašíd tak mají výhodu oproti ostatním zkoumaným materiálům.

Oproti tomu kávová sedlina obsahuje nejmenší podíl vázaného kyslíku, který se během spalování váže na uhlík ve formě CO při nedokonalém spalování a CO₂ při dokonalém spalování. Vysoká míra kyslíku v materiálu pomáhá k hoření, příliš vysoká hodnota ale již může hoření tlumit. Vysoký podíl vázaného kyslíku obsahuje ječmen a skořápky pistácií.

Vodíku je ve všech materiálech mezi 6 a 7 procenty. Dusíku nejvíce v kávové sedlině na úrovni 2,21 % a nejméně v dřevní štěpce s 0,23 %. Síry je ve všech materiálech zanedbatelné množství.

Popelu bylo nejvíce v čajovém odpadu (4,42 %) a ve skořápkách vlašského ořechu (2,69 %) a, nejméně se popel tvořil u dřevní štěpky, a to ve výši 0,33 %.

Vlhkost materiálu byla u všech materiálů shodně kolem 7 %, nutno ale dodat, že šlo o předem sušený materiál. Sušení probíhalo přirozeně na suchém místě po dobu několika dní. Detailní výsledky prvkové analýzy jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2: Prvková analýza původního materiálu

Prvková analýza	Uhlík (%)	Kyslík (%)	Vodík (%)	Dusík (%)	Síra (%)	Popel (%)	Vlhkost (%)
Dřevní štěpka	47,83 ±0,15	38,82	6,41 ±0,02	0,23 ±0,01	0,01	0,33 ±0,01	7,19 ±0,09
Ječmen	41,73 ±0,18	41,94	6,76 ±0,02	1,47 ±0,02	0,10	2,08 ±0,02	6,67 ±0,07
Kávová sedlina	50,26 ±0,15	31,37	7,21 ±0,03	2,21 ±0,02	0,05	1,59 ±0,01	8,22 ±0,05
Čajový odpad	47,01 ±0,28	34,76	5,99 ±0,06	1,79 ±0,10	0,08	4,42 ±0,06	7,06 ±0,07
Vlašský ořech	44,50 ±0,70	39,15	6,25 ±0,10	0,48 ±0,05	0,02	2,69 ±0,15	8,02 ±0,10
Pistácie	45,45 ±0,07	40,71	6,48 ±0,02	0,37 ±0,01	0,03	1,08 ±0,07	6,70 ±0,08
Arašídový ořech	49,63 ±0,12	34,90	6,48 ±0,03	1,41 ±0,02	0,08	1,87 ±0,02	6,48 ±0,10

Lesní a zemědělská biomasa se díky fotosyntéze považuje za biomasu s neutrální uhlíkovou stopou a nízkým obsahem síry a dusíku, což vede k nízkým emisím NO_x a SO₂ při jejím spalování. Spalování biomasy je důležitou součástí energetických koncepcí budoucnosti (Stelte et al. 2011). Navzdory výhodám biomasy jako vhodného topného média však existují problémy, jako je vysoká vlhkost snižující výkon spalování, obtížné rozmělnění na malé částice a relativně nízká objemová hmotnost, jakož i zvýšené nároky na skladování, dopravu a manipulaci. Výroba pelet a torifikace těchto materiálů řeší zmíněné nevýhody (Kaliyan, Vance Morey 2009). Hutnění je metoda přeměny vstupních surovin biomasy na brikety, která není komplikovaným procesem a může adekvátně reagovat na energetické požadavky pro vytápění a vaření ve venkovských oblastech (Dinesha, Kumar, Rosen 2019).

Colantoni popsal kávovou sedlinu jako hodnotnou surovinu s nízkým podílem popela a vysokou výhřevností, což umožňuje výrobu téměř čistých kávových pelet, které jsou vhodné pro použití v otopných systémech (Colantoni et al. 2021). Na spotřebitelské

úrovni lze kávovou sedlinu použít alternativně jako zahradní hnojivo, protože má vysoký obsah živin (Mayson, Williams 2021). Jako agro odpad, který se obvykle ukládá na skládky nebo spaluje, však způsobuje vážné environmentální problémy v důsledku rozpadu a možného uvolňování toxického a zbytkového kofeinového taninu, lipidových kontaminantů nebo metanu za anaerobních podmínek, a přispívá tak k nepříznivému vlivu na životní prostředí a klimatickým změnám (Mukherjee et al. 2021).

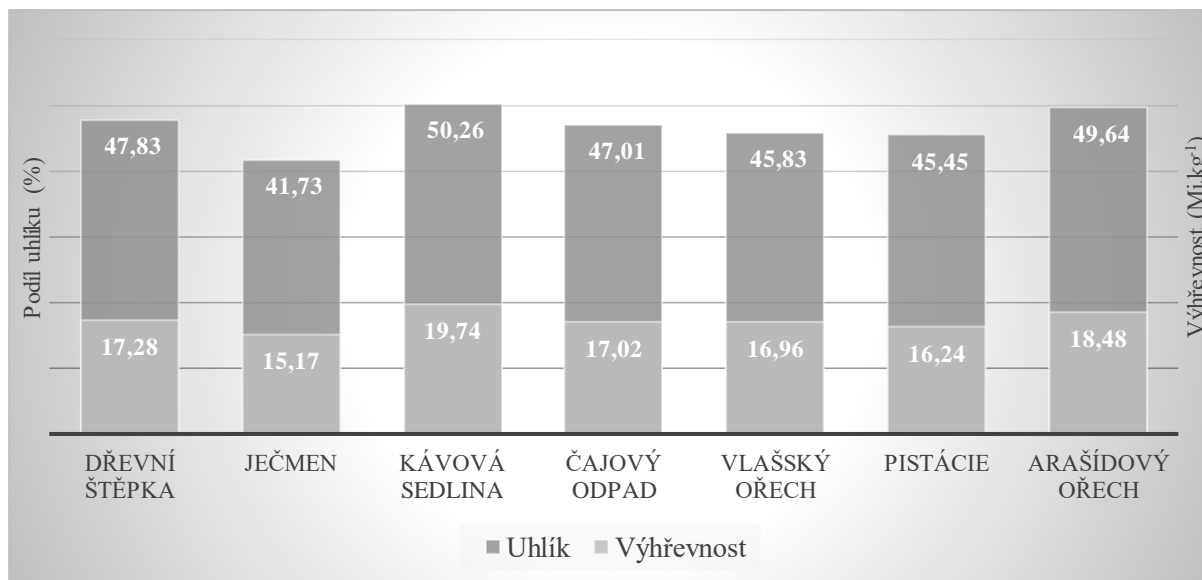
Palivové brikety ze směsi skořápek ořechů kešu (65 %), skořápek ořechů areca (25 %) a mouky z manioku (10 %) stlačené odstředivou silou při rychlosti 90 otáček za minutu vykazovaly potenciál pro vaření v přijatelné míře s nízkými emisemi skleníkových plynů (Chungcharoen, Srisang 2020). Výsledky jiného výzkumu vedou k závěru, že ze směsi skořápek ořechu areca a skořápek semen Simarouba lze vyrobit kvalitní brikety, které lze použít pro vytápění (Ujjinappa, Sreepathi 2018).

6.1.2. Výhřevnost

Konvenční zdroje energie, jako jsou fosilní paliva, dnes pokrývají téměř 81,7 % světových energetických potřeb (Afolabi, Sohail, Cheng 2020). A zatímco způsoby využití dřevní hmoty jsou všeobecně známé, ať už jako topiva, či ve výrobním truhlářském procesu, možnosti využití kávy, resp. kávové sedliny, zbytku z přípravy čaje či ořechových slupek, nejsou zanedbatelné.

Vzájemný vliv mezi podílem uhlíku a výhřevností materiálu lze vyčíst v Obrázku 10. Vyšší podíl uhlíku má za následek vyšší výhřevnost.

Kávová sedlina s nejvyšším podílem uhlíku 50,26 % má výhřevnost 19,74 MJ.kg⁻¹, skořápky arašíd s podílem uhlíku 49,64 % mají výhřevnost 18,48 MJ.kg⁻¹. Běžně spalovaný materiál, dřevní štěpka, má podíl uhlíku 47,83 % a výhřevnost 17,28 MJ.kg⁻¹. Čajový odpad má výhřevnost ve výši 17,02 MJ.kg⁻¹. To je lehce pod výsledky naměřenými Sermyagina, jehož výhřevnost dosáhla hodnoty 20,39 MJ.kg⁻¹ u zeleného čaje a 20,26 MJ.kg⁻¹ u černého čaje (Sermyagina et al. 2021).



Obrázek 12: Porovnání podílu uhlíku s výhřevností materiálu

Energetický potenciál použité kávové sedliny je nižší než u fosilních paliv, představuje však vyšší energetický obsah ve srovnání s jinými druhy biomasy (Mayson, Williams 2021; Campos-Vega et al. 2015). Domácnosti dnes mohou kávovou sedlinu přímo spalovat (Malaták et al. 2020), využívat jako hnojivo pro své zahrady nebo jej nechat odvézt jako bioodpad do sběrné stanice, kde by se v budoucnu mohl nechat materiál torifikovat a zlepšit tak jeho vlastnosti. Kávovou sedlinu lze také použít jako palivo v průmyslových kotlích díky jeho vysoké výhřevnosti přibližně 20,9 MJ.kg⁻¹, která je srovnatelná s jinými zemědělsko-průmyslovými materiály (Tamelová et al. 2021).

Průmyslově lze kávovou sedlinu využít také jako potenciální zdroj pro výrobu bionafty nebo palivových pelet (Kondamudi, Mohapatra, Misra 2008; Caetano, Silvaa, Mata 2012; McNutt, He 2019; Mata, Martins, Caetano 2018; Bejenari et al. 2021; Tehrani, Aznar, Kiros 2015). Kávová sedlinu lze také přeměnit na biopolymer s přidanou hodnotou (Sen, Baidurah 2021).

Čajový odpad jako volitelný materiál pro výrobu pelet vyhodnotil Mizuno. Podle jednoho z výsledků nemá konečný průměr pelet vliv na strukturu materiálu složeného z celulózy, polocelulózy a ligninu (Mizuno et al. 2016). Pua měřil výhřevnost a obsah prvků v peletách vyrobených z čajového odpadu vzniklého při sběru čaje v Malajsii. Pelety vyrobené ze 100 % čajového odpadu vykazovaly výhřevnost 17,393 MJ.kg⁻¹, trvanlivost 99,93 % a dobrou vlhkost 9,581 %. Výsledky ukázaly, že čajový odpad má velký potenciál být zdrojem palivových pelet (Pua et al. 2020). Intagun zkoumal využití čajového odpadu jako příměsi k výlisku z cukrové třtiny pro výrobu pelet. Výsledky

ukázaly, že přídavek čajového odpadu pozitivně zvýšil objemovou hmotnost a výhřevnost výmětů z cukrové třtiny (Intagun et al. 2019). U palivových pelet vyrobených z použitých zemědělských zbytků však byly zjištěny vysoké obsahy popela a usazenino-tvorných prvků (Zhang, Guo 2014).

6.2.Prvková analýza torifikovaného materiálu

6.2.1. Dřevní štěpka a ječmen

Dřevní štěpka je pro účely výzkumu torifikována při teplotách 250 °C a 280 °C. Torifikací upravený materiál dřevní štěpky je poté smíchán s ječmenem čímž je vytvořena směs pro následnou výrobu pelet.

Torifikace dřevní štěpky zvýšila podíl uhlíku v materiálu a snížila obsah vodíku a kyslíku. Se zvýšením podílu uhlíku v dřevní štěpce se zvýšila i výhřevnost materiálu z 17,28 MJ.kg⁻¹ pro sušený materiál na 19,40 MJ.kg⁻¹ pro materiál torifikovaný při 250 °C a 21,67 MJ.kg⁻¹ pro materiál torifikovaný při 280 °C. Poměrově se výhřevnost torifikované smrkové štěpky zvýšila při 250 °C o 12,27 % a při 280 °C o 25,41 %.

Tento výsledek je v souladu s hodnocením (Pimchuai, Dutta, Basu 2010) a (Rudolfsson, Stelte, Lestander 2015), kteří analyzovali, že předúprava torifikací zvyšuje účinnost spalovacích procesů biomasy. Výsledek analýzy je v souladu také s (Arias et al. 2008), který pozoroval, že díky torifikaci palivového materiálu vykazuje biouhel vyšší výhřevnost, nízký obsah vlhkosti a stává se křehčím než původní biomasa.

Negativní dopad torifikace je v narůstajícím podílu popele z 0,33 % pro sušený materiál na 1,40 % pro materiál torifikovaný při 280 °C. Běžný podíl popela v pevné dřevní hmotě je obvykle 0,1-8,4 % hm. v závislosti na kvalitě dřevní hmoty (Vassilev et al. 2010).

Výroba pelet má mírně negativní vliv na složení materiálu. Vyrobené pelety vykazují nižší obsah uhlíku a výhřevnost než čistý materiál. Pelety mají také vyšší obsah popela, vody a dusíku.

Výsledné pelety mají mírně vyšší obsah vlhkosti ve výši 7-8 % na rozdíl od vstupního materiálu (4-7 %). To je způsobeno zvlhčením materiálu na 15 % vlhkosti během procesu výroby pelet. Zvýšení obsahu vlhkosti při výrobě pelet vede ke snížení obsahu uhlíku, což zapříčiňuje i snížení výhřevnosti materiálu. Výsledná vlhkost pelet je měřena 2 týdny po jejich výrobě, vzorky jsou skladovány v laboratorní hale fakulty.

Výhodou pelet je jednodušší transport materiálu a dávkování ve spalné komoře. Detailní výsledky analýzy jsou v Tabulce 3.

Tabulka 3: Prvková analýza dřevní štěpky a ječmene

	Uhlík (%)	Kyslík (%)	Vodík (%)	Dusík (%)	Síra (%)	Popel (%)	Vlhkos t (%)	Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)
Dřevní štěpka	47,83 ±0,15	38,82	6,41 ±0,02	0,23 ±0,01	0,01	0,33 ±0,01	7,19 ±0,09	17,28
Dřevní štěpka 250 °C	53,12 ±0,09	36,77	5,98 ±0,03	0,20 ±0,02	0,01	0,92 ±0,01	4,14 ±0,07	19,40
Dřevní štěpka 280 °C	58,83 ±0,12	30,13	5,73 ±0,03	0,23 ±0,01	0,01	1,40 ±0,02	3,38 ±0,06	21,67
Ječmen zrno	41,73 ±0,18	41,94	6,76 ±0,07	1,47 ±0,02	0,10	2,08 ±0,02	6,67 ±0,02	15,17
Směs štěpka + ječmen (materiál)	45,79 ±0,12	39,86	6,53 ±0,04	0,64 ±0,01	0,03	0,91 ±0,01	7,01 ±0,05	16,57
Směs štěpka 250 °C + ječmen (materiál)	49,33 ±0,11	38,50	6,24 ±0,05	0,62 ±0,01	0,03	1,31 ±0,01	4,47 ±0,05	17,99
Směs štěpka 280 °C + ječmen (materiál)	53,13 ±0,17	34,07	6,07 ±0,04	0,65 ±0,01	0,03	1,62 ±0,02	4,98 ±0,04	19,50
Směs štěpka + ječmen (pelety)	44,24 ±0,12	38,47	6,74 ±0,05	1,53 ±0,02	0,03	1,16 ±0,01	8,86 ±0,07	15,92
Směs štěpka 250 °C + ječmen (pelety)	45,63 ±0,13	37,97	6,55 ±0,04	1,35 ±0,02	0,03	1,54 ±0,02	7,83 ±0,06	16,48
Směs štěpka 280 °C + ječmen (pelety)	47,61 ±0,11	36,18	6,48 ±0,04	1,48 ±0,02	0,03	1,44 ±0,01	7,67 ±0,06	17,46

6.2.2. Kávová sedlina

Dalším ze zkoumaných materiálů je kávová sedlina neboli odpad z přípravy kávy.

Kávovou sedlinu je možné torifikovat na biouhel a zlepšit tak její vlastnosti. výroba biouhlu ze vstupních surovin biomasy je rozumným přístupem ke zmírňování klimatických změn skleníkových plynů a k nakládání s odpady (Yang et al. 2017; Lessa, Nunes, Fajardo 2018; Levy, Reinecke, Manning 2016). Potenciální využití vzniklých zbytků pro výrobu paliv nebo chemikálií s vysokou přidanou hodnotou pomocí pyrolýzy vede přinejmenším k atraktivnímu a náročnému řešení pro kávovou sedlinu, jejíž celosvětová produkce stále roste (Fermoso, Mašek 2018; Pfluger 1975).

Hlavními složkami sušeného vzorku kávové sedliny jsou uhlík (50,26 % hm.) a kyslík (31,37 % hm.). Podíl vlhkosti činí 8,22 % hm. a podíl popela je 1,59 % hm. Výhřevnost kávové sedliny je 19,74 MJ.kg⁻¹, což je v souladu se zjištěními Silvy (Silva et al. 1998),

který stanovil výhřevnost přibližně $20,92 \text{ MJ.kg}^{-1}$, a také Colantoniho (Colantoni et al. 2021), který stanovil mírně vyšší výhřevnost na $22,36 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Při torifikaci na $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ se vlhkost původního vzorku ($8,22 \text{ } \%$ hm.) snížila na pouhých $0,86 \text{ } \%$ hm. Při následném zvýšení teploty torifikace se vlhkost pomalu zvedla až na hodnotu $6,17 \text{ } \%$ hm. u torifikátu vyrobeného při $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Feroso (Feroso, Mašek 2018) naměřil vlhkost původního vzorku ve výši $5 \text{ } \%$ hm.

Se zvyšující teplotou torifikace se zvedá podíl uhlíku, dusíku a popela v materiálu. Uhlík, hlavní zdroj energie materiálu, navyšuje svůj podíl z $50,26 \text{ } \%$ hm. původního materiálu až na nejvyšší naměřenou hodnotu $77,94 \text{ } \%$ hm. při $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ stupni torifikace. Feroso a Mašek naměřili podíl uhlíku kávové sedliny na velmi podobné úrovni $53,90 \text{ } \%$ hm. (Feroso, Mašek 2018) stejně jako Mayson, který naměřil podíl uhlíku na úrovni $53,32 \text{ } \%$ hm. (Mayson, Williams 2021).

Množství uhlíku v kávové sedlině přímo ovlivňuje výhřevnost materiálu. Zvýšení podílu uhlíku vede ke zvýšení výhřevnosti materiálu až do $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ torifikace. U vzorků torifikovaných při $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je patrný pokles výhřevnosti, i přes to, že podíl uhlíku je stále na rostoucím trendu. Nejvyšší naměřená výhřevnost je při $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve výši $31,26 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Tento pokles výhřevnosti lze vysvětlit snížením podílu vodíku, který je důležitým faktorem při spalovacích procesech.

Se zvyšující teplotou torifikace klesá naopak obsah vodíku a kyslíku (Aniszewska et al. 2020; Tamelová et al. 2021). Hladina vodíku se snižuje z $6,29 \text{ } \%$ hm. u původního vzorku na $2,60 \text{ } \%$ hm. při $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a hladina kyslíku se snižuje z $31,37 \text{ } \%$ hm. u původního vzorku na $3,17 \text{ } \%$ hm. při $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Podíl popela se zvýšil z $1,59 \text{ } \%$ hm. u původního vzorku na $6,95 \text{ } \%$ hm. při $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Podíl dusíku se zvýšil z $2,21 \text{ } \%$ hm. u původního vzorku na $4,41 \text{ } \%$ hm. u při $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledky obsahu popela jsou mírně vyšší než naměřené Colantonim, jehož hodnoty nepřesáhly $1,30 \text{ } \%$ hm. (Colantoni et al. 2021). Detailní výsledky analýzy kávové sedliny jsou v Tabulce 4.

Tabulka 4: Prvková analýza kávové sedliny

Kávová sedlina	Uhlík (%)	Kyslík (%)	Vodík (%)	Dusík (%)	Síra (%)	Popel (%)	Vlhkost (%)	Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)
Kávová sedlina	50,26 ±0,15	31,37	7,21 ±0,03	2,21 ±0,02	0,05	1,59 ±0,01	8,22 ±0,05	19,74
Kávová sedlina 250 °C	59,51 ±0,16	28,01	6,95 ±0,03	2,68 ±0,02	0,12	1,98 ±0,02	0,86 ±0,01	23,85
Kávová sedlina 300 °C	71,04 ±0,18	14,34	6,89 ±0,04	3,39 ±0,02	0,09	2,95 ±0,01	1,46 ±0,01	29,09
Kávová sedlina 350 °C	76,67 ±0,20	7,59	6,21 ±0,04	3,92 ±0,03	0,06	4,08 ±0,02	1,65 ±0,02	31,26
Kávová sedlina 450 °C	77,94 ±0,19	5,08	3,85 ±0,03	4,41 ±0,04	0,03	6,35 ±0,02	2,64 ±0,02	29,88
Kávová sedlina 550 °C	76,97 ±0,23	3,17	3,29 ±0,03	4,09 ±0,03	0,05	6,95 ±0,03	6,1 ±0,04	27,49

6.2.3. Čajový odpad

Čajový odpad neboli zůstatek čajových lístků z přípravy čaje, je dalším materiálem pro analýzu dopadu torifikace.

Se zvýšením úrovně torifikace se navyšuje podíl uhlíku a dusíku v materiálu. Uhlík, hlavní zdroj výhřevnosti materiálu, navyšuje svou koncentraci ze 47,01 % hm. pro původní materiál na 73,68 % hm. pro materiál torifikován při 550 °C. Podíl dusíku se zvyšuje z 1,79 % hm. u původního materiálu na 2,56 % hm. u materiálu torifikovaného při 300 °C a 2,21 % hm. u materiálu torifikovaného při 550 °C. Zvyšující podíl uhlíku zvyšuje také výhřevnost materiálu, až do úrovně 350 °C. Nad teplotou 350 °C začíná materiál degradovat a výhřevnost klesá, přestože podíl uhlíku se stále zvyšuje. Podle analýzy Sermyagina je výhřevnost rovna 20,39 MJ.kg⁻¹ pro zelený čaj a 20,26 MJ.kg⁻¹ pro černý čaj. O něco vyšší hodnota v návaznosti na vyšší obsah uhlíku (Sermyagina et al. 2021).

S rostoucí teplotou torifikace klesá naopak podíl vodíku a kyslíku. Podíl vodíku se sníží z 5,20 % hm. u původního materiálu na 2,04 % hm. při 550 °C a podíl kyslíku se sníží z 34,76 % hm. u původního materiálu na 3,91 % hm. při 550 °C.

Hladina vlhkosti materiálu se snížila ze 7,06 % hm. pro původní materiál na 0,76 % hm. při 250 °C a postupně navýšila při vyšších teplotách torifikace až na výsledných 6,29 % hm. při 550 °C.

Jak uvádí Sermyagina ve svých výsledcích, netorifikovaný zelený čaj obsahuje 53,14 % hm. uhlíku (52,93 % hm. černý čaj), lehce nad výsledky této analýzy (Sermyagina et al. 2021). Podíl vodíku u zeleného čaje 6,17 % hm. (6,21 % hm. černého čaje) je opět o něco více u Sermyagina než v tomto výzkumu. Nižší podíl naměřil Sermyagina u podílu kyslíku, u zeleného čaje 31,56 % hm. (32,61 % hm. u černého čaje) ve srovnání s 34,76 % hm. u původního materiálu tohoto výzkumu.

Nežádoucí složkou paliva je popel, který v porovnání s ostatními materiály dosáhl u čajového odpadu nejvyšších koncentrací. Se stupněm torifikace se podíl popele v materiálu postupně navyšuje ze 4,42 % hm. pro původní materiál na 12,55 % hm. při 550 °C. Podrobný rozbor prvků je uveden v Tabulce 5.

Tabulka 5: Prvková analýza čajového odpadu

	Uhlík (%)	Kyslík (%)	Vodík (%)	Dusík (%)	Síra (%)	Popel (%)	Vlhkost (%)	Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)
Čajový odpad	47,01 ±0,28	34,76	5,99 ±0,06	1,79 ±0,10	0,08	4,42 ±0,06	7,06 ±0,07	17,02
Čajový odpad 250 °C	55,67 ±0,32	30,46	5,45 ±0,07	2,34 ±0,06	0,10	5,35 ±0,10	0,76 ±0,23	20,16
Čajový odpad 300 °C	64,40 ±0,38	19,25	5,03 ±0,07	2,56 ±0,02	0,12	7,15 ±0,06	1,81 ±0,36	23,45
Čajový odpad 350 °C	68,54 ±0,38	13,29	4,43 ±0,07	2,55 ±0,03	0,12	9,00 ±0,20	2,60 ±0,42	26,19
Čajový odpad 450 °C	72,92 ±0,44	7,57	3,31 ±0,09	2,49 ±0,08	0,12	11,45 ±0,17	2,76 ±0,79	24,01
Čajový odpad 550 °C	73,68 ±0,50	3,91	2,74 ±0,011	2,21 ±0,04	0,11	12,55 ±0,12	6,29 ±0,92	24,47

Čajový odpad má i spoustu alternativních využití. Používá se například jako absorbent znečištění vody. Kontaminace antibiotiky a šíření bakterií odolných vůči

antimikrobiálními látkám jsou globálními problémy životního prostředí. K adsorpčnímu odstraňování antibiotik se obvykle používají materiály na bázi uhlíku (včetně aktivního uhlí, biouhlu a černého uhlí). Použití "zeleného", levného nebo udržitelného biouhlu pro sorpci kontaminantů přináší ekonomické a environmentální výhody (Krasucka et al. 2021; Ahsan et al. 2018; Khalil et al. 2020; Xu et al. 2018).

Dále jsou ohledně využití čajového odpadu široce diskutovány možnosti výroby bioplynu. Aksay měřil, jak čajový odpad funguje jako příměs k hnoji skotu pro výrobu bioplynu. Výsledky ukázaly, že spolu spalování odpadů (75 % hnoje skotu a 25 % čajového odpadu) má pozitivní vliv na výtěžnost bioplynu a metanu (Aksay, Ozkaymak, Calhan 2018). Produkci bioplynu se zabývali také Manyuchi, Ayas a Ozarslan. Manyuchi změřil, že digestát z čajového odpadu je bohatý na dusík (4,5 %), fosfor (0,6 %) a draslík (4,6 %) a mohl by být potenciálně využit jako biohnojivo. Z čajového odpadu lze vyrábět bioplyn a biosložku v rámci iniciativy "Waste to resource" (Manyuchi, Mbohwa, Muzenda 2018). V návaznosti na Ayase je čajový odpad jako zemědělský odpad slibnou surovinou pro získání plynu bohatého na vodík zplyňováním (Ayas, Esen 2016). Ozarslan odhalil, že čajový odpad může být vhodným kandidátem pro výrobu bioplynu jako biopaliva nejen pro svou dostupnost a zdrojovou využitelnost, ale také pro možný synergický efekt při spolu spalování (Özarslan et al. 2021). Çağlar testoval vzorky odpadu z čajových továren, které podrobil přímé a katalytické pyrolýze za účelem získání plynných produktů bohatých na vodík při požadovaných teplotách. Vzorky, jak neupravené, tak impregnované katalyzátorem, byly upraveny pyrolýzou při teplotách 500 °C, 575 °C, 650 °C, 700 °C a 750 °C. Celkový objem a výtěžek plynu z obou forem pyrolýzy se zvyšoval se zvyšující se teplotou (Çağlar, Demirbaş 2001).

Dále se čajový odpad používá v medicíně, neboť čaj vykazuje řadu zdravotních přínosů, jako je zmírnění metabolického syndromu, protinádorové účinky a posílení imunity (Sheikhzadeh et al. 2011). Čaj se obvykle skládá z celulózy, hemicelulózy, ligninu, polyfenolů a proteinů. Bohatý obsah polyfenolů v čaji je zodpovědný za různé zdraví prospěšné účinky, jako jsou antioxidační, protizánětlivé, anti karcinogenní, protinádorové, kardio protektivní a několik dalších biologických aktivit (Debnath, Halder, Purkait 2021). Podle Chaudhuriho vykázal extrakt z černého čaje významnou inhibici proti zánětu zprostředkovanému glukózoxydázou, a to jak v exsudativní, tak proliferativní formě a stejně tak v chronické fázi zánětu (Nag Chaudhuri et al. 2005).

6.2.4. Skořápky vlašského ořechu

Součástí výzkumu je i trojice ořechových skořápek, vlašského ořechu, pistácií a arašídového ořechu. První z trojice je analyzována skořápka vlašského ořechu.

Podíl uhlíku s rostoucí teplotou torifikace roste výrazně z 44,50 % hm. u původního materiálu k 83,25 % hm. při 550 °C. Obdobně roste i výhřevnost materiálu, z 16,96 MJ.kg⁻¹ u původního vzorku k 30 MJ.kg⁻¹ při 550 °C.

Obdobně jako u ostatních zkoumaných materiálů, podíl kyslíku a vodíku s rostoucí teplotou torifikace klesá, nejvýrazněji u kyslíku z 39,15 % hm. původního vzorku na 1,78 % hm. při 550 °C. Obsah popele skořápek vlašského ořechu je vysoký, od 2,69 % hm. u původního vzorku až 10,02 % hm. při torifikaci na úrovni 550 °C. Větší detail nabízí Tabulka 6.

Tabulka 6: Prvková analýza skořápek vlašského ořechu

Skořápky vlašského ořechu	Uhlík (%)	Kyslík (%)	Vodík (%)	Dusík (%)	Síra (%)	Popel (%)	Vlhkost (%)	Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)
Vlašský ořech	44,50 ±0,20	39,15	6,25 ±0,04	0,48 ±0,01	0,02	2,69 ±0,05	8,02 ±0,10	16,96
Vlašský ořech 250 °C	55,46 ±0,22	34,61	5,74 ±0,06	0,52 ±0,01	0,02	3,43 ±0,06	0,26 ±0,01	20,03
Vlašský ořech 300 °C	66,92 ±0,23	22,15	5,34 ±0,05	0,59 ±0,01	0,02	4,59 ±0,05	0,46 ±0,01	25,09
Vlašský ořech 350 °C	74,53 ±0,22	12,48	4,32 ±0,04	0,69 ±0,01	0,02	6,81 ±0,06	1,39 ±0,02	25,74
Vlašský ořech 450 °C	81,65 ±0,24	4,68	3,52 ±0,03	0,77 ±0,01	0,02	8,17 ±0,07	1,48 ±0,03	28,33
Vlašský ořech 550 °C	83,25 ±0,27	1,78	2,80 ±0,02	0,81 ±0,02	0,02	10,02 ±0,10	1,67 ±0,02	30,00

Jako typický odpad z biomasy se k přípravě biouhlu a biooleje pyrolýzou často používají skořápky vlašských ořechů (Zhu et al. 2019).

6.2.5. Skořápky pistácie

Skořápky pistácie jsou druhým materiálem z výzkumu ořechových skořápek.

Podíl uhlíku u pistácií roste s teplotou torifikace z 45,45 % hm. u původního vzorku k 87,52 % hm. při 550 °C. Pro vzorek torifikovaný při 550 °C je podíl uhlíku skořápek pistácie lehce vyšší než u skořápek vlašského ořechu, přesto, že výchozí podíl uhlíku původního vzorku je u obou materiálů téměř shodný, lehce pod 46 %. Výhřevnost pistácie se pohybuje také v obdobných hodnotách, od 16,24 MJ.kg⁻¹ původního materiálu k 30,68 MJ.kg⁻¹ při 550 °C.

Podíl kyslíku a vodíku se stupněm torifikace klesá a dusík mírně roste. Podíl popele roste z 1,08 % hm. původního vzorku k 4,76 % hm. při 550 °C. Vlhkost materiálu nejprve klesne při 250 °C na 0,28 % hm., aby poté s teplotou torifikace narostla na 1,78 % hm. při 550 °C. Větší detail nabízí Tabulka 7.

Tabulka 7: Prvková analýza skořápek pistácie

Skořápky pistácie	Uhlík (%)	Kyslík (%)	Vodík (%)	Dusík (%)	Síra (%)	Popel (%)	Vlhkost (%)	Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)
Pistácie	45,45 ±0,23	40,71	6,48 ±0,06	0,37 ±0,01	0,03	1,08 ±0,02	6,70 ±0,08	16,24
Pistácie 250 °C	54,88 ±0,24	37,08	5,84 ±0,07	0,43 ±0,01	0,03	1,48 ±0,01	0,28 ±0,01	20,10
Pistácie 300 °C	66,22 ±0,26	25,03	5,29 ±0,04	0,49 ±0,01	0,03	2,28 ±0,02	0,76 ±0,01	24,81
Pistácie 350 °C	75,97 ±0,27	14,80	4,41 ±0,013	0,56 ±0,01	0,03	2,80 ±0,03	1,66 ±0,03	27,43
Pistácie 450 °C	82,57 ±0,29	7,46	3,56 ±0,03	0,61 ±0,01	0,03	4,33 ±0,05	1,69 ±0,02	29,17
Pistácie 550 °C	87,52 ±0,32	2,65	2,83 ±0,03	0,71 ±0,02	0,03	4,76 ±0,07	1,78 ±0,03	30,68

6.2.6. Skořápky arašíd

Skořápky arašíd jsou posledním materiálem ze sady analýz skořápek ořechů.

Podíl uhlíku roste s teplotou torifikace z 49,64 % hm. u původního vzorku k 81,97 % hm. při 550 °C. Ze všech vzorků ořechových skořápek roste podíl uhlíku s teplotou nejméně, i když se stále jedná o minimální rozdíl od ostatních ořechů. Obdobně roste i výhřevnost materiálu z 18,48 MJ.kg⁻¹ původního vzorku k 28,11 MJ.kg⁻¹ při 550 °C. Arašidy tak mají ze všech ořechových skořápek nejvyšší výhřevnost původního materiálu, během úpravy torifikací ovšem zaznamená nejmenší přírůstek.

Zůstatková hodnota kyslíku klesajícího s rostoucí teplotou oproti původnímu materiálu je 13,8 % při 550 °C, nejvíce ze zkoumaných ořechových skořápek (5,2 % u vlašského ořechu, 6,7 % u pistácie). Podíl popele roste s teplotou z 1,87 % hm. původního materiálu k 6,30 % hm. při 550 °C. Větší detail nabízí Tabulka 8.

Tabulka 8: Prvková analýza skořápek arašídů

Skořápky arašíd	Uhlík (%)	Kyslík (%)	Vodík (%)	Dusík (%)	Síra (%)	Popel (%)	Vlhkost (%)	Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)
Arašidy	49,64 ±0,18	34,90	6,48 ±0,07	1,41 ±0,01	0,08	1,87 ±0,01	6,48 ±0,06	18,48
Arašidy 250 °C	56,35 ±0,19	32,90	6,08 ±0,05	1,60 ±0,01	0,08	2,15 ±0,02	0,98 ±0,01	19,87
Arašidy 300 °C	63,46 ±0,22	24,78	5,76 ±0,05	1,71 ±0,01	0,08	2,99 ±0,02	1,42 ±0,01	21,80
Arašidy 350 °C	72,44 ±0,23	15,05	4,62 ±0,04	1,90 ±0,02	0,08	4,30 ±0,04	1,90 ±0,02	24,78
Arašidy 450 °C	77,24 ±0,25	9,35	3,49 ±0,03	1,90 ±0,02	0,08	6,07 ±0,04	2,28 ±0,02	26,36
Arašidy 550 °C	81,97 ±0,28	4,84	2,81 ±0,02	1,95 ±0,03	0,08	6,30 ±0,06	2,48 ±0,03	28,11

Pro skořápky ořechů existuje jen velmi málo životaschopných trhů ve velkém měřítku. Zpracovatelé totiž uvádějí, že za likvidaci přebytečných skořápek platí poplatky ve výši

11-27 USD za metrickou tunu, což je přímý zásah do jejich zisků. S každým dalším rokem se světová poptávka po ořechách zvyšuje, ale především bez skořápek (Almond Board of California 2021), což produkuje ještě více skořápek, které je třeba zlikvidovat.

6.2.7. Výhřevnost materiálu, shrnutí

Ze všech zkoumaných materiálů vykazují skořápky arašídů nejvyšší výhřevnost původního materiálu. Působením torifikace je sledován největší inkrement výhřevnosti u skořápek pistácie ve výši 189 %. Nejvyšších hodnot výhřevnosti se dosahuje u kávové sedliny a čajového odpadu při torifikaci 350 °C, u skořápek ořechů při torifikaci 550 °C.

Tabulka 9: Výhřevnost materiálu, shrnutí

Výhřevnost	Původní materiál (MJ.kg ⁻¹)	Nejvyšší hodnota (MJ.kg ⁻¹)		Nárůst (%)
		350 °C	550 °C	
Kávová sedlina	19,74	350 °C	31,26	158
Čajový odpad	17,02	350 °C	26,19	154
Vlašáky	16,96	550 °C	30,00	177
Pistácie	16,24	550 °C	30,68	189
Arašídy	18,48	550 °C	28,11	152

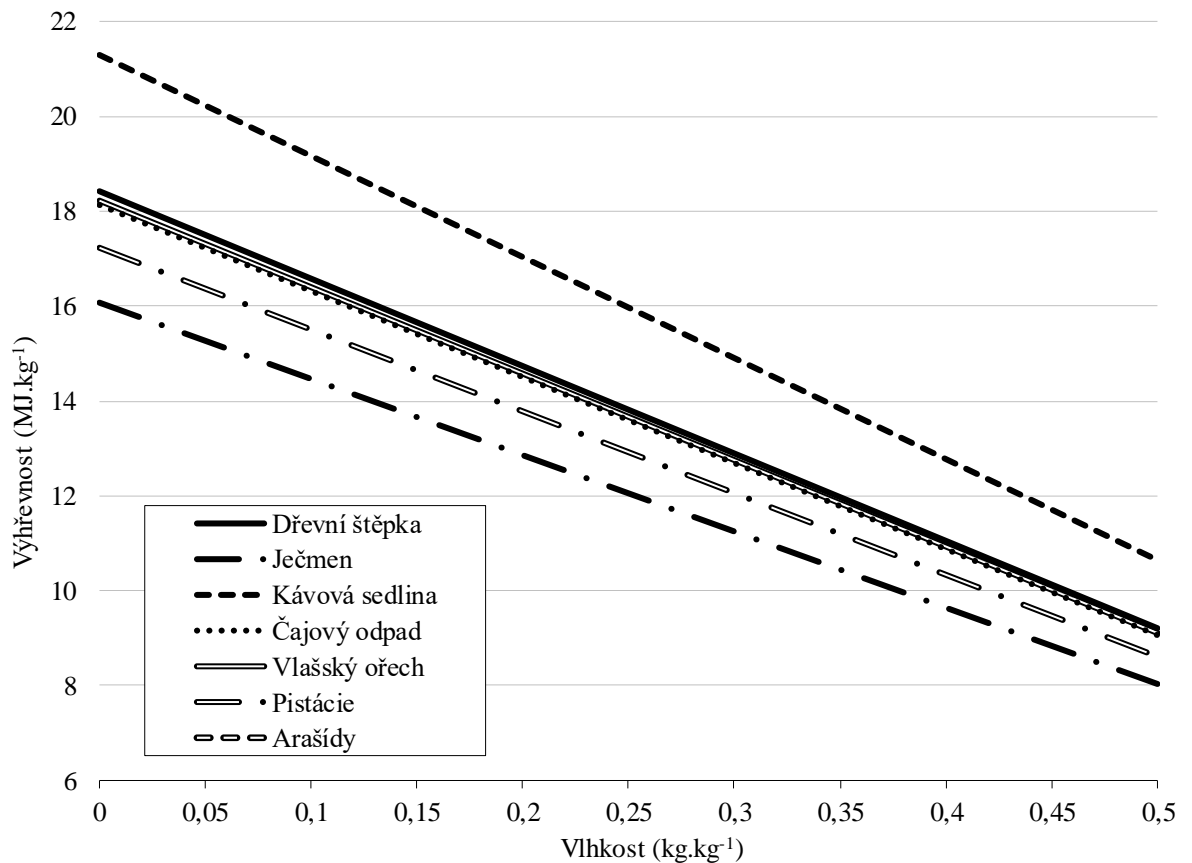
Při porovnání výsledků s výzkumy jiných autorů obsahuje například pomerančová kůra výhřevnost 24,97 MJ.kg⁻¹ při teplotě torifikace 275 °C, což je podobný výsledek jako je naměřen u kávové sedliny (26,47 MJ.kg⁻¹) a vyšší výsledek než u všech ostatních zkoumaných materiálů (Tamelová, Malat'ák, Velebil 2018). Fermentovaný palmový olej dosáhl nejvyšší výhřevnosti 21,25 MJ.kg⁻¹ což je vyšší hodnota, než analyzované původní materiály (Mohammad et al. 2021). Uhlí obsahuje přibližně 23–28 MJ.kg⁻¹, což je hodnota, které je možné dosáhnout u všech zkoumaných materiálů použitím dané teploty torifikace.

6.3. Stechiometrická analýza

6.3.1. Přepočítání výhřevnosti paliva podle ČSN 44 1353

Jednou z analýz stochiometrie je přepočítání výhřevnosti paliva v závislosti na vlhkosti paliva. Základní přehled zkoumaných materiálů je uveden v Obrázku 11. Výhřevnost

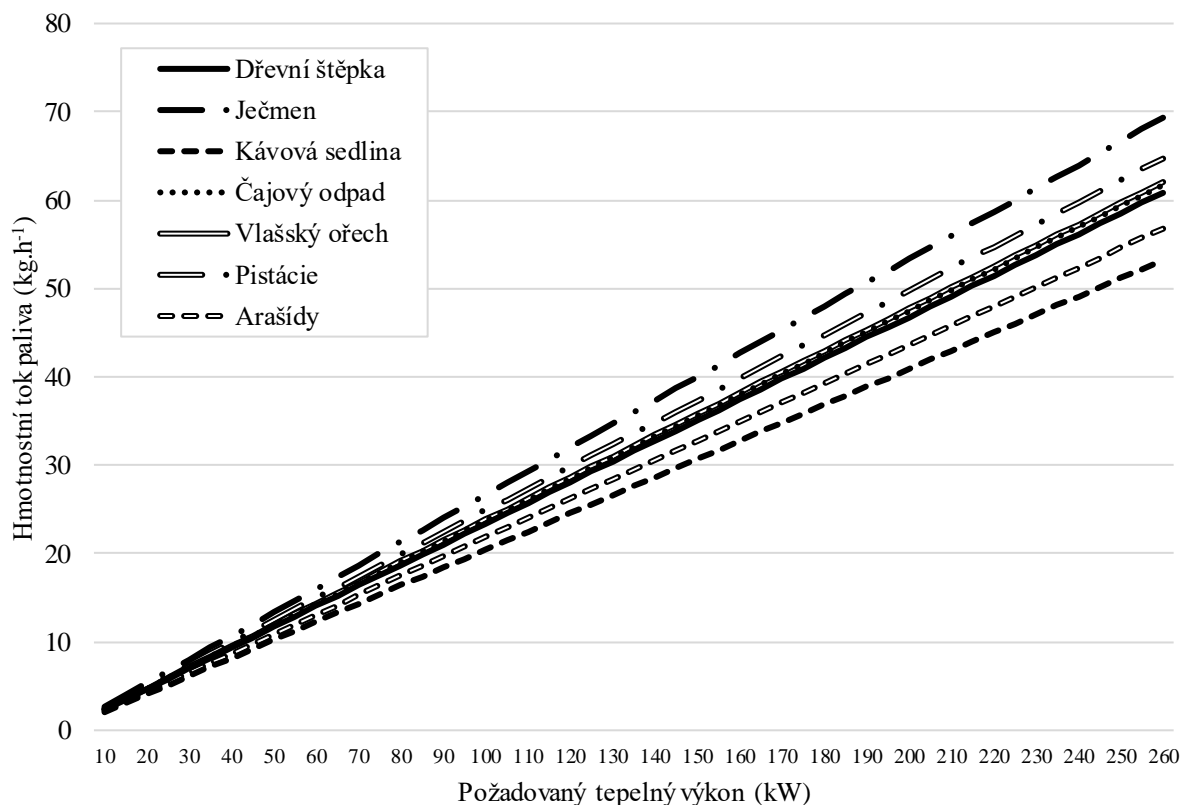
materiálu je nepřímo úměrná vlhkosti u všech vzorků. Nejvyšší výhřevnost při nulové vlhkosti obsahuje čajový odpad. Detailní analýza pro torifikované vzorky materiálu je k nahlédnutí v jednotlivých příložených člancích. Torifikovaný materiál obsahuje vyšší výchozí výhřevnost než původní materiál, obdobně má ale klesající tendenci výhřevnosti se zvyšující se vlhkostí.



Obrázek 13: Přepočet výhřevnosti paliva podle ČSN 44 1353

6.3.2. Hmotnostní tok paliva s požadovaným tepelným výkonem

Další stechiometrickou analýzou je přepočet hmotnostního toku paliva do spalovací komory za účelem dosažení požadovaného tepelného výkonu zařízení. Pro získání tepelného výkonu 260 kW, je potřeba přivést každou hodinu do spalovací komory téměř 70 kg ječmene, nebo pouze 53 kg kávové sedliny. Větší tepelný výkon vyžaduje vyšší hmotnostní tok paliva. Porovnání původních materiálů je uvedeno v Obrázku 12. Detailnější porovnání torifikovaného materiálu je uvedeno v jednotlivých člancích, i pro ty platí závislost vyššího přívodu paliva pro dosažení vyššího tepelného výkonu.



Obrázek 14: Hmotnostní tok paliva s požadovaným tepelným výkonem

6.4. Emisní koncentrace malého tepelného zařízení (20kW)

Součástí stechiometrie jsou i teoretické výpočty hmotnostního a objemového spalování. Pro názornost výpočtu využijeme teorie hmotnostního spalování na příkladu malého tepelného zařízení o výkonu 20kW, obvyklého pro vytápění rodinných domů domácností. U domácností uvažujeme o využití původních přirozeně sušených materiálů, na kterých provedeme výpočet a porovnání emisních koncentrací.

Skořápky vlašského ořechu vyžadují nejmenší množství kyslíku a vzduchu pro dokonalé spalování, na rozdíl od pistácií, které vyžadují z měřených vzorků nejvyšší množství. Podobných hodnot dosahuje i hmotnostní množství suchých a vlhkých spalin. Hodnoty hmotnostního spalování jsou velmi podobné referenčnímu vzorku dřevní štěpky. Skořápky pistácie ale dosáhly v těchto výpočtech nejhorších výsledků, kdy potřebují nejvíce kyslíku ze zkoumaných vzorků a dosahují nejvyšších hodnot koncentrace spalin. Nejvyšších emisních hodnot oxidu siřičitého dosahuje ječmen a dále pak čajový odpad. Emisní koncentrace dusíku je vyrovnaná, nejvyšší je u skořápek pistácie vlivem vyššího potřebného množství vzduchu pro spalování. Emisní koncentrace argonu je u všech vzorků vyrovnaná. Úplný přehled hmotnostního spalování je v Tabulce 10.

Tabulka 10: Emisní koncentrace malého tepelného zařízení (20kW)

	Štěpka	Ječmen	Kávová sedlina	Čajový odpad	Skořápky vlašského ořechu	Skořápky pistácie	Skořápky arašídů
Teor. mn. kyslíku pro dok. spalování (kg.kg ⁻¹)	6,19	6,20	6,21	6,22	6,15	6,27	6,21
Teor. mn. vzduchu pro dok. spalování (kg.kg ⁻¹)	26,67	26,73	26,75	26,80	26,49	27,04	26,79
Skut. mn. vzduchu pro spal. (kg.kg ⁻¹)	50,93	51,05	51,09	51,18	50,60	51,65	51,17
Hmot. mn. vlhkých spalin (kg.kg ⁻¹)	57,00	57,67	56,53	57,15	56,50	57,95	56,88
Hmot. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	52,29	52,42	51,86	52,57	51,83	53,02	52,31
Teor. hm. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	28,26	28,33	27,75	28,50	27,95	28,64	28,17
Hm. mn. CO ₂ (kg.kg ⁻¹)	8,15	8,10	7,50	8,13	7,95	8,24	7,90
Hm. mn. SO ₂ (kg.kg ⁻¹)	0,001	0,011	0,004	0,008	0,002	0,003	0,007
Hm. mn. H ₂ O (kg.kg ⁻¹)	4,71	5,25	4,67	4,58	4,68	4,94	4,57
Hm. mn. N ₂ (kg.kg ⁻¹)	38,45	38,61	38,65	38,72	38,22	39,00	38,68
Hm. mn. O ₂ (kg.kg ⁻¹)	5,63	5,64	5,65	5,66	5,59	5,71	5,66
Hm. mn. Ar (kg.kg ⁻¹)	0,065	0,065	0,065	0,066	0,065	0,066	0,065

6.5. Emisní koncentrace velkého tepelného zařízení (260 kW)

V druhém případě provedeme výpočet hmotnostního spalování ve větším tepelném zařízení o výkonu 260 kW, vhodného k vytápění větších domů či podniků.

6.5.1. Emisní koncentrace torifikované dřevní štěpky a ječmene (260kW)

Na příkladu kontrolního vzorku dřevní štěpky torifikované při 250 °C a 280 °C je možné porovnat vliv torifikace také u ostatních zkoumaných vzorků. Torifikované dřevní štěpky je díky její vyšší výhřevnosti (Tabulka 3) potřebné menší množství k dosažení požadovaného výkonu tepelného zařízení, vyžaduje ale větší množství vzduchu, aby došlo k dokonalému spalování. Emisní hodnoty oxidu siřičitého jsou v případě torifikované dřevní štěpky zanedbatelné, emisní hodnoty argonu mírně rostoucí s rostoucím stupněm torifikace. Ječmen má díky nízké výhřevnosti vyšší požadavky na množství materiálu potřebného ke spálení, při podobných požadavcích na množství vzduchu pro dokonalé spalování. Množství oxidu siřičitého je více než desetinásobný oproti dřevní štěpce. Větší detail nabízí Tabulka 11.

Tabulka 11: Emisní koncentrace torifikované dřevní štěpky a ječmene (260kW)

Dřevní štěpka	0 °C	250 °C	280 °C	Ječmen
Hmotnostní tok paliva (kg.h ⁻¹)	60,21	53,64	48,02	68,59
Teor. mn. kyslíku pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	80,43	80,33	81,10	80,61
Teor. mn. vzduchu pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	346,66	346,23	349,58	347,45
Skut. mn. vzduchu pro spalování (kg.kg ⁻¹)	662,12	661,31	667,69	663,63
Hmot. mn. vlhkých spalin (kg.kg ⁻¹)	741,00	733,29	734,06	749,69
Hmot. množství suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	679,81	677,96	682,59	681,47
Teoretické hm. množství suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	367,38	365,92	367,54	368,33
Hmotnostní množství CO ₂ (kg.kg ⁻¹)	105,89	104,78	103,88	105,25
Hmotnostní množství SO ₂ (kg.kg ⁻¹)	0,012	0,011	0,010	0,137
Hmotnostní množství H ₂ O (kg.kg ⁻¹)	61,19	55,33	51,46	68,22
Hmotnostní množství N ₂ (kg.kg ⁻¹)	499,87	499,22	504,05	501,88
Hmotnostní množství O ₂ (kg.kg ⁻¹)	73,19	73,10	73,80	73,35
Hmotnostní množství Ar (kg.kg ⁻¹)	0,848	0,846	0,855	0,849

6.5.2. Emisní koncentrace torifikované kávové sedliny (260kW)

Nejmenšího množství materiálu nutného pro spalování v 260kW kotli dosahuje kávová sedlina při 350 °C torifikaci, to je dáno degradací materiálu mezi 350 °C a 450 °C, kdy klesá výhřevnost materiálu. Pro spalování torifikátu při 550 °C je potřeba vyšší množství vzduchu pro dokonalé spalování, tento vzorek zároveň dosahuje vysoké hodnoty suchých spalin a emisní koncentrace CO₂ a N₂. Podíl SO₂ je nejnižší u torifikátu při 450 °C. Více v Tabulce 12.

Tabulka 12: Emisní koncentrace torifikované kávové sedliny (260kW)

Kávová sedlina	0 °C	250 °C	300 °C	350 °C	450 °C	550 °C
Hmotnostní tok paliva (kg.h ⁻¹)	52,71	43,64	35,78	33,30	34,83	37,85
Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	80,67	81,01	81,95	81,64	80,52	84,37
Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	347,73	349,17	353,23	351,88	347,08	363,65
Skut. mn. vzduchu pro spal. (kg.kg ⁻¹)	664,17	666,92	674,66	672,10	662,93	694,56
Hmot. mn. vlhkých spalin (kg.kg ⁻¹)	734,95	728,70	728,60	723,19	714,43	749,56
Hmot. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	674,20	674,74	679,42	677,69	675,86	710,59
Teor. hm. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	360,81	360,04	362,22	360,55	363,05	382,85
Hmotnostní množství CO ₂ (kg.kg ⁻¹)	97,45	95,54	93,51	93,93	99,84	107,12
Hmotnostní množství SO ₂ (kg.kg ⁻¹)	0,053	0,105	0,064	0,040	0,021	0,038
Hmotnostní množství H ₂ O (kg.kg ⁻¹)	60,75	53,96	49,18	45,50	38,57	38,97
Hmotnostní množství N ₂ (kg.kg ⁻¹)	502,44	504,52	510,41	508,57	501,87	525,77
Hmotnostní množství O ₂ (kg.kg ⁻¹)	73,41	73,72	74,57	74,29	73,28	76,77
Hmotnostní množství Ar (kg.kg ⁻¹)	0,850	0,854	0,864	0,860	0,849	0,889

6.5.3. Emisní koncentrace torifikovaného čajového odpadu (260kW)

Čajový odpad vyžaduje nejvyššího přísunu vzduchu při spalování torifikátu při 450 °C. Tento vzorek zároveň disponuje nejvyššími hodnotami hmotnosti suchých spalin, CO₂ a N₂. Podíl SO₂ dosahuje ze zkoumaných materiálů zatím nejvyšších hodnot okolo 0,1 kg.kg⁻¹. Podíl argonu je srovnatelný s ostatními vzorky. Více v Tabulce 13.

Tabulka 13: Emisní koncentrace torifikovaného čajového odpadu (260kW)

Čajový odpad	0 °C	250 °C	300 °C	350 °C	450 °C	550 °C
Hmotnostní tok paliva (kg.h ⁻¹)	61,11	51,60	44,38	39,73	43,34	42,52
Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	80,82	83,06	84,88	80,54	91,47	88,85
Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	348,37	358,03	365,88	347,17	394,26	382,96
Skut. mn. vzduchu pro spal. (kg.kg ⁻¹)	665,40	683,85	698,84	663,09	753,03	731,45
Hmot. mn. vlhkých spalin (kg.kg ⁻¹)	742,94	752,18	760,00	718,23	812,99	789,80
Hmot. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	683,42	699,54	711,95	675,87	769,95	750,07
Teor. hm. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	370,45	376,86	382,20	362,99	414,62	404,93
Hmotnostní množství CO ₂ (kg.kg ⁻¹)	105,63	105,64	105,12	100,16	116,22	115,20
Hmotnostní množství SO ₂ (kg.kg ⁻¹)	0,098	0,103	0,111	0,096	0,105	0,092
Hmotnostní množství H ₂ O (kg.kg ⁻¹)	59,52	52,64	48,05	42,35	43,04	39,73
Hmotnostní množství N ₂ (kg.kg ⁻¹)	503,30	517,33	528,58	501,47	569,42	553,00
Hmotnostní množství O ₂ (kg.kg ⁻¹)	73,55	75,59	77,25	73,29	83,24	80,85
Hmotnostní množství Ar (kg.kg ⁻¹)	0,852	0,875	0,895	0,849	0,964	0,936

6.5.4. Emisní koncentrace torifikovaných skořápek ořechů (260kW)

První ze zkoumaných skořápek ořechů jsou torifikované skořápky vlašského ořechu. U skořápek vlašského ořechu je znatelný nárůst potřebného množství vzduchu pro dokonalé spalování s rostoucí teplotou torifikace mezi 300 °C a 350 °C v porovnání s ostatními materiály, u kterých k tomuto nárůstu dochází obvykle až nad teplotou 350 °C. Obdobný nárůst mají i koncentrace spalin, hmotnostní množství CO₂ a N₂. Podíl SO₂ s teplotou torifikace naopak klesá a je zhruba desetinový v porovnání s obsahem SO₂ u čajového odpadu. Hmotnostní tok paliva se u skořápek všech ořechů s rostoucí teplotou torifikace snižuje díky navyšující se výhřevnosti paliva. Více v Tabulce 14.

Tabulka 14: Emisní koncentrace torifikovaných skořápek vlašského ořechu (260kW)

Skořápky vlašského ořechu	0 °C	250 °C	300 °C	350 °C	450 °C	550 °C
Hmotnostní tok paliva (kg.h ⁻¹)	61,34	51,93	41,48	40,43	36,74	34,68
Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	79,91	82,35	82,39	88,80	88,55	86,08
Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	344,42	354,97	355,13	382,76	381,69	371,02
Skut. mn. vzduchu pro spal. (kg.kg ⁻¹)	657,85	678,00	678,31	731,07	729,02	708,64
Hmot. mn. vlhkých spalin (kg.kg ⁻¹)	734,54	747,67	737,21	789,61	783,16	759,28
Hmot. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	673,76	693,74	690,15	744,64	742,36	722,18
Teor. hm. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	363,35	373,82	370,09	399,67	398,37	387,80
Hmotnostní množství CO ₂ (kg.kg ⁻¹)	103,38	105,92	102,10	110,82	110,33	107,80
Hmotnostní množství SO ₂ (kg.kg ⁻¹)	0,028	0,024	0,019	0,018	0,017	0,016
Hmotnostní množství H ₂ O (kg.kg ⁻¹)	60,78	53,93	47,06	44,97	40,79	37,11
Hmotnostní množství N ₂ (kg.kg ⁻¹)	496,80	511,98	512,19	552,05	550,51	535,12
Hmotnostní množství O ₂ (kg.kg ⁻¹)	72,71	74,94	74,98	80,81	80,58	78,33
Hmotnostní množství Ar (kg.kg ⁻¹)	0,842	0,868	0,868	0,936	0,933	0,907

U skořápek pistácie je skok podobný jako u skořápek vlašského ořechu, tj. mezi 300 °C a 350 °C, ale již ne tak dramatický. Na zmíněné úrovni se navyšuje teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování i hmotnostní množství suchých a vlhkých spalin. Podíl emisí CO₂ je pro všechny torifikované vzorky skořápek pistácie stabilní, naopak podíl N₂ je s torifikátem při 350 °C silně rostoucí. Více v Tabulce 15.

Tabulka 15: Emisní koncentrace torifikovaných skořápek pistácie (260kW)

Skořápky pistácie	0 °C	250 °C	300 °C	350 °C	450 °C	550 °C
Hmotnostní tok paliva (kg.h ⁻¹)	64,05	51,76	41,93	37,94	35,67	33,92
Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	81,56	80,64	81,03	84,06	85,52	85,41
Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	351,56	347,58	349,29	362,31	368,61	368,14
Skut. mn. vzduchu pro spal. (kg.kg ⁻¹)	671,49	663,89	667,14	692,01	704,05	703,14
Hmot. mn. vlhkých spalin (kg.kg ⁻¹)	753,38	733,79	727,13	748,61	758,25	755,49
Hmot. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	689,22	680,02	680,47	705,89	718,65	718,73
Teor. hm. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	372,37	366,75	365,67	379,36	386,44	386,95
Hmotnostní množství CO ₂ (kg.kg ⁻¹)	107,06	104,46	102,13	105,99	108,31	109,16
Hmotnostní množství SO ₂ (kg.kg ⁻¹)	0,045	0,036	0,029	0,026	0,025	0,024
Hmotnostní množství H ₂ O (kg.kg ⁻¹)	64,16	53,77	46,65	42,72	39,60	36,76
Hmotnostní množství N ₂ (kg.kg ⁻¹)	507,04	501,29	503,72	522,50	531,60	530,93
Hmotnostní množství O ₂ (kg.kg ⁻¹)	74,22	73,38	73,74	76,49	77,82	77,72
Hmotnostní množství Ar (kg.kg ⁻¹)	0,860	0,850	0,854	0,886	0,901	0,900

Poslední ze skupiny zkoumaných skořápek ořechů jsou skořápky arašíd. U nich dochází k nárůstu požadavku na množství vzduchu pro dokonalé spalování již od 250 °C torifikace. S torifikační teplotou paliva roste i hmotnostní množství spalin vzorku. Při teplotě torifikace nad 300 °C již ale hodnoty potřebného množství vzduchu a hmotnostního množství spalin stagnují a s rostoucí teplotou klesají. Množství CO₂ je u všech vzorků skořápek arašídů vyrovnané, množství SO₂ je s rostoucí teplotou mírně klesající. Více v Tabulce 16.

Tabulka 16: Emisní koncentrace torifikovaných skořápek arašídů (260kW)

Skořápky arašídů	0 °C	250 °C	300 °C	350 °C	450 °C	550 °C
Hmotnostní tok paliva (kg.h ⁻¹)	56,29	52,36	47,74	42,00	39,46	37,02
Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	80,79	86,50	90,39	89,66	87,87	86,66
Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování (kg.kg ⁻¹)	348,25	372,85	389,62	386,46	378,76	373,52
Skut. mn. vzduchu pro spal. (kg.kg ⁻¹)	665,15	712,13	744,17	738,15	723,44	713,43
Hmot. mn. vlhkých spalin (kg.kg ⁻¹)	739,40	783,66	811,70	799,39	781,11	768,49
Hmot. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	680,02	726,53	757,17	752,40	739,80	730,59
Teor. hm. mn. suchých spalin (kg.kg ⁻¹)	366,15	390,50	406,03	404,09	398,44	393,95
Hmotnostní množství CO ₂ (kg.kg ⁻¹)	102,74	108,51	111,41	111,89	112,09	111,58
Hmotnostní množství SO ₂ (kg.kg ⁻¹)	0,086	0,080	0,073	0,065	0,061	0,057
Hmotnostní množství H ₂ O (kg.kg ⁻¹)	59,38	57,13	54,53	47,00	41,31	37,90
Hmotnostní množství N ₂ (kg.kg ⁻¹)	502,81	538,31	562,48	557,91	546,76	539,18
Hmotnostní množství O ₂ (kg.kg ⁻¹)	73,52	78,72	82,26	81,59	79,96	78,86
Hmotnostní množství Ar (kg.kg ⁻¹)	0,851	0,912	0,953	0,945	0,926	0,913

6.6. Ekonomické posouzení využití alternativních paliv

Motivací k přechodu společnosti k alternativním palivům může být několik, jednak to může být snaha o zlepšení dopadu na životní prostředí motivovaná vlastním přesvědčením či regulací zvenčí, nebo může jít o motivaci finanční úspory. Každá taková změna v procesu podniku vyžaduje počáteční investici a dále změnu v zásobovacím procesu, která může přinést pravidelné navýšení nákladů, či úsporu. V případě regulace, bývá často počáteční investice subvencovaná státní dotací.

Z provozních změn je třeba uvážit náklady spojené s přípravou materiálu, tj. sušení, torifikaci a zhutnění (výroby pelet či briket) případně s jeho nákupem. Dále je třeba uvážit změnu v personálním obsazení podniku.

Počáteční investice i změny v následném provozu jsou specifické pro daný podnik a nedají se tak přesně vypočítat bez znalosti konkrétní situace ve které se podnik nachází. U podniku, který využívá energie ke svému chodu, je přechod na alternativní paliva otázkou přizpůsobení spalovacího zařízení, přívodu paliva, odvodu popele a procesu hoření což s sebou nese určité náklady ve formě prvotní investice. Spalovací zařízení je přizpůsobené pro pálení zhutněného paliva (pelety, brikety) přivedeného automatickým dopravníkem. Proces hoření je uzpůsoben, aby nedocházelo ke spékání popele uvnitř pece, změnou teploty hoření a navýšením kapacit odvodu popele. Zautomatizováním procesu takovýto podnik může ušetřit na provozních nákladech za ušetřenou práci svých zaměstnanců. V rámci provozních nákladů je nutné uvážit i změnu ve výši servisních prací, modernizováním provozu většinou dochází k servisní úspoře. Zvýšením výhřevnosti paliva dochází k úspoře prostorové náročnosti při skladování a úspoře náročnosti transportu paliva. Dalším faktorem spojeným s přechodem na obnovitelné zdroje energie je úspora při nákupu emisních povolenek. Zhodnocení přechodu k alternativním palivům lze vypočítat porovnáním výše ušetřených provozních nákladů s náklady na počáteční investici rozprostřenou do několika let, obvykle po dobu životnosti nové technologie.

Dalším důležitým aspektem je změna ve způsobu získávání nového paliva a změna v ceně paliva. Nové alternativní palivo může podnik nakoupit jako čistý původní materiál, nebo připravené k okamžitému použití, či ho může získat vlastní činností. V případě nákupu čistého původního materiálu či získání materiálu z vlastní činnosti je nutné posouzení nákladovosti výroby paliva k použití, tj. torifikace materiálu a následné zhutnění. Pro torifikaci materiálu může být využito odpadní teplo z ostatních procesů podniku. Ke zhodnocení způsobu získávání nového paliva je nutné uvážit náklady jednotlivých variant a možnosti podniku v samostatné přípravě. Jinou výchozí pozici má podnik, který daný materiál přímo produkuje a jinou, který takový materiál musí kupovat.

7. Závěry a doporučení

Problematika využití biomasy pro energetické účely je velmi široká a vyžaduje kromě experimentů v laboratoři, také reálné dlouhodobé posouzení v praxi.

Kávová sedlina se prosadila jako materiál využitelný pro spalování a výrobu tepla v domácnosti svojí vysokou výhřevností a nízkým podílem popele. Zároveň je kávová sedlina vhodná ke spalování nízkými nároky na hmotnostní množství vzduchu pro dokonalé spalování a nízkými emisními hodnotami porovnatelnými s dřevní štěpkou. Jediným problémem je vysoká vlhkost závislá na formě přípravy kávového nápoje. Sušení materiálu nevyžaduje externí zdroje energie, stačí dostatek větraného prostoru, kde by se použitá káva mohla skladovat a nedocházelo k tvoření plísně.

Obdobné charakteristiky má i odpad z přípravy čaje, tj. vysokou výhřevnost a vysokou vlhkost, řešitelnou skladováním na dobře větraném místě. Jedinými rozdíly čajového odpadu oproti kávové sedlině je vysoký podíl popele (4,11 % hm.), daný svým začleněním mezi bylinnou biomasu, a vyšší hodnotou emisí CO₂ ve spalinách. Z důvodu vysokého podílu popele může být využití čaje jako paliva pro domácnosti problematické a může dojít k zanášení kotle, vyšší hodnoty CO₂ nejsou také příznivé pro využití čaje jako paliva.

Ze skořápek ořechů dosáhly nejlepších výsledků skořápky arašídů s relativně malým podílem popele (1,75 % hm.) a vysokou výhřevností (18,48 MJ.kg⁻¹). Nízkou úroveň popele (2,01 % hm.) mají i skořápky pistácie, ty mají ale vysoké nároky na hmotnostní množství vzduchu pro dokonalé spalování a vysoké emise CO₂ a N₂. Vysoké úrovně popele (5,51 % hm.) ale obsahují skořápky vlašského ořechu, vyšší než čajové lístky, jehož použití v domácnostech by tak mohlo být také problematické. Výhodou ořechových skořápek je jejich přirozená nízká vlhkost, tudíž nemusí docházet k žádné předúpravě či sušení.

Vyhodnocením první hypotézy mohu konstatovat, že kávová sedlina je využitelná pro domácí použití v otopném zařízení, pokud má domácnost dostatek prostor pro její sušení. Dále je možné využít skořápek ořechů arašídů, bez nutnosti sušení. Využití čajového odpadu a skořápek vlašských ořechů pro vysoký podíl popele nedoporučuji. Využití skořápek pistácie pro vysoké hodnoty CO₂ a N₂ také nedoporučuji.

Pelety vyrobené z dřevní štěpky a ječmene si zachovaly vlastnosti vhodné ke spalování. Výhřevnost materiálu se liší v závislosti na stupni torifikace dřevní štěpky v rozmezí

16–20 MJ.kg⁻¹. Torifikace dřevní štěpky zároveň nemá vliv na hmotnostní množství vzduchu potřebného k dokonalému spalování, ani na emise CO₂, SO₂ a N₂, a to ani v kombinaci s ječmenem při výrobě směsi pro výrobu pelet. Dá se tím potvrdit druhá hypotéza, že zbytky ječmene se dají použít jako palivo v kombinaci s dřevní štěpkou.

U třetí hypotézy, všechny zkoumané materiály zlepšily svou výhřevnost vlivem torifikace, u některých materiálů ale došlo ke zhoršení emisní stopy. Čajový odpad a kávová sedlina mají nejvyšší výhřevnost při torifikaci na 350 °C, skořápkám ořechů stoupla výhřevnost až do nejvyšší testované teploty torifikace 550 °C.

S mírou torifikace, ale zároveň roste i podíl popele, vlhkost a emisní stopa některých materiálů. U kávové sedliny má torifikace zanedbatelný vliv na potřebné množství vzduchu pro dokonalé spalování i u hmotnostního množství emisí CO₂ a N₂. Podíl SO₂ se zvyšující teplotou torifikace dokonce klesá. Podíl popele u kávové sedliny roste do úrovně skoro 7 % hm. při torifikaci 550 °C. U čajového odpadu potřebné množství vzduchu a emisní hmotnostní množství skokově roste mezi teplotou torifikace 350 °C a 450 °C, se stoupající teplotou roste výrazně i podíl popele materiálu k téměř 12 % hm. při torifikaci 550 °C. Kávovou sedlinu i čajový odpad je tak vhodné upravit torifikací do teploty 350 °C, u čajového odpadu je nutné počítat s větším množstvím popele a upravit pro to vhodným způsobem proces spalování aby nedocházelo k zanášení kotle a případnému spékání popele v kotli.

Podíl přes 12 % hm. má popel i u torifikovaných skořápek vlašského ořechu při 550 °C, podíl popele u skořápek pistácie a arašidu je do 6 % hm. při 550 °C, podobně, jako u kávové sedliny. Skořápkám vlašského ořechu a skořápkám pistácie roste skokově s teplotou torifikace hladina potřebného množství vzduchu pro dokonalé spalování a hmotnostní množství spalin mezi 300 °C až 350 °C. Skořápkám arašíd potřebné množství vzduchu a hmotnostní množství spalin již od 0 °C do 300 °C torifikace. Obdobně roste i hmotnostní množství emisí CO₂ a N₂, skořápkám vlašského ořechu a pistácií mezi 300 °C a 350 °C a skořápkám arašíd mezi 0 °C a 300 °C. Z výsledků plyne doporučení úrovně torifikace 300 °C pro skořápky vlašských ořechů, u které je míra výhřevnosti srovnatelná s ostatními zkoumanými materiály a nedochází k přílišné tvorbě popele a zátěže prostředí v podobě emisní stopy CO₂. U skořápek pistácie je vhodnou teplotou pro torifikaci 350 °C díky menšímu vlivu torifikace na podíl popele a emisní stopu paliva. U skořápek arašidu dochází k nárůstu množství spalin a CO₂ již od počátku torifikace do 300 °C, nad kterou se jsou hodnoty již stabilní. Lze tak zvážit možnost

torifikace skořápek arašídů při maximální měřené teplotě 550 °C a dosáhnout tak nejvyšší výhřevnosti materiálu.

Torifikace materiálu zlepšuje vlastnosti paliva pro průmyslové využití, čímž se dá potvrdit třetí hypotéza, její možné využití v reálném provozu, ale závisí na podmínkách daného podniku.

Součástí publikovaných článků je i posouzení využití torifikované kávové sedliny, čajového odpadu a skořápek ořechů jako půdního doplňku. Kávová sedlina i čajový odpad mohou být použity jako půdní doplněk, pokud jsou torifikovány při 350 °C. Skořápky vlašských ořechů je možné použít jako půdní doplněk po torifikaci při 300–350 °C, skořápky arašídů po torifikaci při 300 °C a skořápky pistácií po torifikaci při 350 °C.

Pro získání přesnějších výsledků za účelem stanovení ideální míry torifikace jednotlivých materiálů je zapotřebí pokračovat ve výzkumu otestováním v reálném provozu a zohlednění všech dalších neméně důležitých faktorů specifických pro daný podnik či danou domácnost.

Seznam publikací autora

Práce publikované:

JENÍČEK, Lukáš, NEŠKUDLA, Michal, MALAŤÁK, Jan, VELEBIL, Jan and PASSIAN, Luboš, 2021. Spruce and Barley Elemental and Stoichiometric Analysis Affected by the Impact of Pellet Production and Torrefaction. *Acta Technologica Agriculturae*. 1 December 2021. Vol. 24, no. 4, pp. 166–172. DOI 10.2478/ATA-2021-0028.

JENÍČEK, Lukáš, TUNKLOVÁ, Barbora, MALAŤÁK, Jan, NEŠKUDLA, Michal and VELEBIL, Jan, 2022. Use of Spent Coffee Ground as an Alternative Fuel and Possible Soil Amendment. *Materials 2022*, Vol. 15, Page 6722. Online. 27 September 2022. Vol. 15, no. 19, pp. 6722. [Accessed 30 October 2022]. DOI 10.3390/MA15196722.

TUNKLOVÁ, Barbora, JENÍČEK, Lukáš, MALAŤÁK, Jan, NEŠKUDLA, Michal, VELEBIL, Jan and HNILIČKA, František, 2022. Properties of Biochar Derived from Tea Waste as an Alternative Fuel and Its Effect on Phytotoxicity of Seed Germination for Soil Applications. *Materials 2022*, Vol. 15, Page 8709. Online. 7 December 2022. Vol. 15, no. 24, pp. 8709. [Accessed 11 January 2023]. DOI 10.3390/MA15248709.

Práce k publikaci připravené:

JENÍČEK, Lukáš, TUNKLOVÁ, Barbora, MALAŤÁK, Jan, MALAŤÁKOVÁ, Jitka, NEŠKUDLA, Michal and VELEBIL, Jan. Nutshell biochar impact on the environment as an alternative fuel or as a soil applicant

Použitá literatura

AFOLABI, Oluwasola O.D., SOHAIL, M. and CHENG, Yu Ling, 2020. Optimisation and characterisation of hydrochar production from spent coffee grounds by hydrothermal carbonisation. *Renewable Energy*. 1 March 2020. Vol. 147, pp. 1380–1391. DOI 10.1016/j.renene.2019.09.098.

AHSAN, Md Ariful, KATLA, Sai Krishna, ISLAM, Md Tariqul, HERNANDEZ-VIEZCAS, Jose Angel, MARTINEZ, Luis M., DÍAZ-MORENO, Carlos A., LOPEZ, Jorge, SINGAMANENI, Srinivasa R., BANUELOS, Jose, GARDEA-TORRESDEY, Jorge and NOVERON, Juan C., 2018. Adsorptive removal of methylene blue, tetracycline and Cr(VI) from water using sulfonated tea waste. *Environmental Technology & Innovation*. 1 August 2018. Vol. 11, pp. 23–40. DOI 10.1016/J.ETI.2018.04.003.

AKBAYRAK, Serdar, ÖZÇİFÇİ, Zehra and TABAK, Ahmet, 2020. Activated carbon derived from tea waste: A promising supporting material for metal nanoparticles used as catalysts in hydrolysis of ammonia borane. *Biomass and Bioenergy*. 1 July 2020. Vol. 138. DOI 10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105589.

AKSAY, Mehmet Volkan, OZKAYMAK, Mehmet and CALHAN, Rahman, 2018. Co-digestion of cattle manure and tea waste for biogas production. *International Journal of Renewable Energy Research*. 1 September 2018. Vol. 8, no. 3, pp. 1346–1353. DOI 10.20508/IJRER.V8I3.7804.G7434.

ALMOND BOARD OF CALIFORNIA, 2021. Crop Reports | Almond Almanac Report. Online. 2021. [Accessed 1 September 2022]. Retrieved from: <https://www.almonds.com/tools-and-resources/crop-reports/almond-almanac>

ANISZEWSKA, Monika, GENDEK, Arkadiusz, HÝSEK, Štěpán, MALAT'ÁK, Jan, VELEBIL, Jan and TAMELOVÁ, Barbora, 2020. Changes in the composition and surface properties of torrefied conifer cones. *Materials*. 2 December 2020. Vol. 13, no. 24, pp. 1–14. DOI 10.3390/ma13245660.

ARIAS, B., PEVIDA, C., FERMOSO, J., PLAZA, M. G., RUBIERA, F. and PIS, J. J., 2008. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Processing Technology*. 1 February 2008. Vol. 89, no. 2, pp. 169–175. DOI 10.1016/J.FUPROC.2007.09.002.

ARNSFELD, S., SENK, D. and GUDENAU, H. W., 2014. The qualification of torrefied wooden biomass and agricultural wastes products for gasification processes. *Journal of*

Analytical and Applied Pyrolysis. 1 May 2014. Vol. 107, pp. 133–141. DOI 10.1016/J.JAAP.2014.02.013.

AYAS, Nezihe and ESEN, Tugce, 2016. Hydrogen production from tea waste. *International Journal of Hydrogen Energy*. 25 May 2016. Vol. 41, no. 19, pp. 8067–8072. DOI 10.1016/J.IJHYDENE.2015.09.156.

AZAPAGIC, Adisa, BORE, John, CHESEREK, Beatrice, KAMUNYA, Samson and ELBEHRI, Aziz, 2016. The global warming potential of production and consumption of Kenyan tea. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112, pp. 4031–4040. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.07.029.

BALLESTEROS, Lina F., TEIXEIRA, José A. and MUSSATTO, Solange I., 2014. Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. *Food and Bioprocess Technology*. 1 December 2014. Vol. 7, no. 12, pp. 3493–3503. DOI 10.1007/S11947-014-1349-Z.

BARSKOV, Stan, ZAPPI, Mark, BUCHIREDDY, Prashanth, DUFRECHE, Stephen, GUILLORY, John, GANG, Daniel, HERNANDEZ, Rafael, BAJPAI, Rakesh, BAUDIER, Jeff, COOPER, Robbyn and SHARP, Richard, 2019. Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks. *Renewable Energy*. 1 November 2019. Vol. 142, pp. 624–642. DOI 10.1016/j.renene.2019.04.068.

BATES, Richard B. and GHONIEM, Ahmed F., 2012. Biomass torrefaction: Modeling of volatile and solid product evolution kinetics. *Bioresource Technology*. 1 November 2012. Vol. 124, pp. 460–469. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2012.07.018.

BEJENARI, Victoria, MARCU, Alexandra, IPATE, Alina Mirela, RUSU, Daniela, TUDORACHI, Nita, ANGHEL, Ion, ȘOFRAN, Ioana Emilia and LISA, Gabriela, 2021. Physicochemical characterization and energy recovery of spent coffee grounds. *Journal of Materials Research and Technology*. 1 November 2021. Vol. 15, pp. 4437–4451. DOI 10.1016/j.jmrt.2021.10.064.

BELITZ, H. D., GROSCH, W. and SCHIEBERLE, P., 2009. Food chemistry. *Food Chemistry*. 2009. pp. 1–1070. DOI 10.1007/978-3-540-69934-7.

BERNA, Francesco, GOLDBERG, Paul, KOLSKA HORWITZ, Liora, BRINK, James, HOLT, Sharon, BAMFORD, Marion and CHAZAN, Michael, 2012. Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape

- province, South Africa. *PNAS*. Online. 2012. [Accessed 15 January 2023]. DOI 10.1073/pnas.1117620109.
- BOROWY and IRIS, 2019. Before UNEP: who was in charge of the global environment? The struggle for institutional responsibility. *Journal of Global History*. Online. 2019. Vol. 14, no. 1, pp. 87–106. [Accessed 15 January 2023]. Retrieved from: https://ideas.repec.org/a/cup/jglhis/v14y2019i01p87-106_00.html
- BRIDGEMAN, T. G., JONES, J. M., WILLIAMS, A. and WALDRON, D. J., 2010. An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. *Fuel*. December 2010. Vol. 89, no. 12, pp. 3911–3918. DOI 10.1016/J.FUEL.2010.06.043.
- BRUNEROVÁ, Anna, ROUBÍK, Hynek and BROŽEK, Milan, 2018. Bamboo Fiber and Sugarcane Skin as a Bio-Briquette Fuel. *Energies 2018, Vol. 11, Page 2186*. Online. 21 August 2018. Vol. 11, no. 9, pp. 2186. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.3390/EN11092186.
- CAETANO, Nídia S., SILVAA, Vânia F.M. and MATA, Teresa M., 2012. Valorization of coffee grounds for biodiesel production. *Chemical Engineering Transactions*. 2012. Vol. 26, pp. 267–272. DOI 10.3303/CET1226045.
- ÇAĞLAR, A. and DEMIRBAŞ, A., 2001. Hydrogen-Rich Gaseous Products from Tea Waste by Pyrolysis. *undefined*. September 2001. Vol. 23, no. 8, pp. 739–746. DOI 10.1080/00908310120370.
- CAI, Haiming, ZOU, Huihuang, LIU, Jingyong, XIE, Wuming, KUO, Jiahong, BUYUKADA, Musa and EVRENDILEK, Fatih, 2018. Thermal degradations and processes of waste tea and tea leaves via TG-FTIR: Combustion performances, kinetics, thermodynamics, products and optimization. *Bioresource Technology*. Online. 1 November 2018. Vol. 268, pp. 715–725. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2018.08.068.
- CAMPOS-VEGA, Rocio, LOARCA-PIÑA, Guadalupe, VERGARA-CASTAÑEDA, Haydé A. and OOMAH, B. Dave, 2015. Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*. Online. 2015. Vol. 45, no. 1, pp. 24–36. [Accessed 26 August 2022]. Retrieved from: https://www.academia.edu/29177134/Spent_coffee_grounds_A_review_on_current_research_and_future_prospects

CBI, 2022. Exporting edible nuts and dried fruits to Europe | CBI. Online. 2022. [Accessed 1 October 2022]. Retrieved from: <https://www.cbi.eu/market-information/processed-fruit-vegetables-edible-nuts/edible-nuts-dried-fruits/europe>

CHEN, Dengyu, GAO, Anjiang, MA, Zhongqing, FEI, Dayi, CHANG, Yu and SHEN, Chao, 2018. In-depth study of rice husk torrefaction: Characterization of solid, liquid and gaseous products, oxygen migration and energy yield. *Bioresource Technology*. 1 April 2018. Vol. 253, pp. 148–153. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2018.01.009.

CHIOU, Bor sen, VALENZUELA-MEDINA, Diana, BILBAO-SAINZ, Cristina, KLAMCZYNSKI, Artur K., AVENA-BUSTILLOS, Roberto J., MILCZAREK, Rebecca R., DU, Wen Xian, GLENN, Greg M. and ORTS, William J., 2015. Torrefaction of pomaces and nut shells. *Bioresour Technol*. 1 February 2015. Vol. 177, pp. 58–65. DOI 10.1016/j.biortech.2014.11.071.

CHIOU, Bor sen, VALENZUELA-MEDINA, Diana, BILBAO-SAINZ, Cristina, KLAMCZYNSKI, Artur P., AVENA-BUSTILLOS, Roberto J., MILCZAREK, Rebecca R., DU, Wen Xian, GLENN, Greg M. and ORTS, William J., 2016. Torrefaction of almond shells: effects of torrefaction conditions on properties of solid and condensate products. *Ind Crops Prod*. 1 August 2016. Vol. 86, pp. 40–48. DOI 10.1016/j.indcrop.2016.03.030.

CHUNGCHAROEN, Thatchapol and SRISANG, Naruebodee, 2020. Preparation and characterization of fuel briquettes made from dual agricultural waste: Cashew nut shells and areca nuts. *Journal of Cleaner Production*. 20 May 2020. Vol. 256, pp. 120434. DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2020.120434.

CICHOROWSKI, Georg, JOA, Bettina, HOTTENROTH, Heidi and SCHMIDT, Mario, 2015. Scenario analysis of life cycle greenhouse gas emissions of Darjeeling tea. *International Journal of Life Cycle Assessment*. Online. 10 April 2015. Vol. 20, no. 4, pp. 426–439. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.1007/S11367-014-0840-0/FIGURES/4.

COFFEE PLANTS OF THE WORLD, 2021. Coffee Plants of the World — Specialty Coffee Association. Online. 2021. [Accessed 26 August 2022]. Retrieved from: <https://sca.coffee/research/coffee-plants-of-the-world>

COLANTONI, A., PARIS, E., BIANCHINI, L., FERRI, S., MARCANTONIO, V., CARNEVALE, M., PALMA, A., CIVITARESE, V. and GALLUCCI, F., 2021. Spent coffee ground characterization, pelletization test and emissions assessment in the

combustion process. *Scientific Reports*. 1 December 2021. Vol. 11, no. 1. DOI 10.1038/s41598-021-84772-y.

CRUZ, Rebeca, CARDOSO, Maria M., FERNANDES, Luana, OLIVEIRA, Marta, MENDES, Eulália, BAPTISTA, Paula, MORAIS, Simone and CASAL, Susana, 2012. Espresso coffee residues: A valuable source of unextracted compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 15 August 2012. Vol. 60, no. 32, pp. 7777–7784. DOI 10.1021/jf3018854.

CRUZ, Rebeca, MENDES, Eulália, TORRINHA, Álvaro, MORAIS, Simone, PEREIRA, José Alberto, BAPTISTA, Paula and CASAL, Susana, 2015. Revalorization of spent coffee residues by a direct agronomic approach. *Food Research International*. Online. 1 July 2015. Vol. 73, pp. 190–196. [Accessed 26 August 2022]. DOI 10.1016/J.FOODRES.2014.11.018.

ČSÚ, 2020. Spotřeba potravin - 2020 | ČSÚ. *Spotřeba potravin*. Online. 2020. [Accessed 1 October 2022]. Retrieved from: <https://www.czso.cz/csu/czso/spotreba-potravin>

DEBNATH, Banhisikha, HALDAR, Dibyajyoti and PURKAIT, Mihir Kumar, 2021. Potential and sustainable utilization of tea waste: A review on present status and future trends. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Online. 1 October 2021. Vol. 9, no. 5. [Accessed 28 August 2022]. DOI 10.1016/J.JECE.2021.106179.

DINESHA, P., KUMAR, Shiva and ROSEN, Marc A., 2019. Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review. *Energy Technology*. Online. 1 May 2019. Vol. 7, no. 5, pp. 1801011. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.1002/ENTE.201801011.

DING, Kuan, ZHONG, Zhaoping, WANG, Jia, ZHANG, Bo, FAN, Liangliang, LIU, Shiyu, WANG, Yunpu, LIU, Yuhuan, ZHONG, Daoxu, CHEN, Paul and RUAN, Roger, 2018. Improving hydrocarbon yield from catalytic fast co-pyrolysis of hemicellulose and plastic in the dual-catalyst bed of CaO and HZSM-5. *Bioresource Technology*. 1 August 2018. Vol. 261, pp. 86–92. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2018.03.138.

DRAGONE, Giuliano, KERSSEMAKERS, Abraham A.J., DRIESSEN, Jasper L.S.P., YAMAKAWA, Celina K., BRUMANO, Larissa P. and MUSSATTO, Solange I., 2020. Innovation and strategic orientations for the development of advanced biorefineries. *Bioresource Technology*. 1 April 2020. Vol. 302. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2020.122847.

DŘEVO PRO ŽIVOT, 2022. Dřevo je cesta | Nadace dřevo pro život. Online. 2022. [Accessed 30 September 2022]. Retrieved from: <https://www.drevoprozivot.cz/drevo-je-cesta/>

ELLIS, Naoko, MASNADI, Mohammad S., ROBERTS, Daniel G., KOCHANNEK, Mark A. and ILYUSHECHKIN, Alexander Y., 2015. Mineral matter interactions during co-pyrolysis of coal and biomass and their impact on intrinsic char co-gasification reactivity. *Chemical Engineering Journal*. Online. 1 November 2015. Vol. 279, pp. 402–408. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.1016/J.CEJ.2015.05.057.

ESPINA, Randell U., BARROCA, Renyl B. and ABUNDO, Michael Lochinvar S., 2022. Proximate Analysis of the Torrefied Coconut Shells. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*. Online. 31 March 2022. Vol. 12, no. 1, pp. 489–494. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.20508/IJRER.V12I1.12902.G8429.

EUROSTAT, 2020. Municipal_waste_generated,_in_selected_years,_1995-2020_(kg_per_capita)_.png (738×879). Online. 2020. [Accessed 30 September 2022]. Retrieved from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/8/8d/Municipal_waste_generated%2C_in_selected_years%2C_1995-2020_%28kg_per_capita%29_.png

EUROSTAT, 2021. Forests, forestry and logging - Statistics Explained. *Forests, forestry and logging*. Online. 2021. [Accessed 30 September 2022]. Retrieved from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Forests,_forestry_and_logging#Forests_in_the_EU

FAN, Yongsheng, CAI, Yixi, LI, Xiaohua, JIAO, Lihua, XIA, Jisheng and DENG, Xiuli, 2017. Effects of the cellulose, xylan and lignin constituents on biomass pyrolysis characteristics and bio-oil composition using the Simplex Lattice Mixture Design method. *Energy Conversion and Management*. 15 April 2017. Vol. 138, pp. 106–118. DOI 10.1016/J.ENCONMAN.2017.01.075.

FANG, Shiwen, YU, Zhaosheng, LIN, Yousheng, HU, Shanchao, LIAO, Yanfen and MA, Xiaoqian, 2015. Thermogravimetric analysis of the co-pyrolysis of paper sludge and municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*. 1 September 2015. Vol. 101, pp. 626–631. DOI 10.1016/J.ENCONMAN.2015.06.026.

FERMOSO, Javier and MAŠEK, Ondřej, 2018. Thermochemical decomposition of coffee ground residues by TG-MS: A kinetic study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1 March 2018. Vol. 130, pp. 249–255. DOI 10.1016/j.jaap.2017.12.007.

- FRAŇKOVÁ, Adéla, DRÁBEK, Ondřej, HAVLÍK, Jaroslav, SZÁKOVÁ, Jiřina and VANĚK, Aleš, 2009. The effect of beverage preparation method on aluminium content in coffee infusions. *Journal of Inorganic Biochemistry*. November 2009. Vol. 103, no. 11, pp. 1480–1485. DOI 10.1016/j.jinorgbio.2009.06.012.
- GARCÍA, R., GIL, M. v., RUBIERA, F. and PEVIDA, C., 2019. Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. *Fuel*. 1 September 2019. Vol. 251, pp. 739–753. DOI 10.1016/J.FUEL.2019.03.141.
- GARRIDO, Maria Angeles, CONESA, Juan A. and GARCIA, Maria Dolores, 2017. Characterization and production of fuel briquettes made from biomass and plastic wastes. *Energies*. 2017. Vol. 10, no. 7. DOI 10.3390/EN10070850.
- GENDEK, Arkadiusz, ANISZEWSKA, Monika, MALAŤÁK, Jan and VELEBIL, Jan, 2018. Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. *Biomass and Bioenergy*. 1 October 2018. Vol. 117, pp. 173–179. DOI 10.1016/J.BIOMBIOE.2018.07.025.
- GLOBAL CARBON PROJECT, 2020. Global Carbon Project (GCP). . 2020.
- GUNASEE, Sanjana D., CARRIER, Marion, GORGENS, Johann F. and MOHEE, Romeela, 2016. Pyrolysis and combustion of municipal solid wastes: Evaluation of synergistic effects using TGA-MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1 September 2016. Vol. 121, pp. 50–61. DOI 10.1016/J.JAAP.2016.07.001.
- HAKKOU, Mohammed, PÉTRISSANS, Mathieu, GÉRARDIN, Philippe and ZOULALIAN, André, 2006. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polymer Degradation and Stability*. 1 February 2006. Vol. 91, no. 2, pp. 393–397. DOI 10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2005.04.042.
- HNILIČKA, František, HNILIČKOVÁ, Helena, KUDRNA, Jiří, KRAUS, Kamil, KUKLA, Ján and KUKLOVÁ, Margita, 2020. Combustion calorimetry and its application in the assessment of ecosystems. *undefined*. 1 October 2020. Vol. 142, no. 2, pp. 771–781. DOI 10.1007/S10973-020-09961-9.
- HUBLIN, Jean Jacques, BEN-NCER, Abdelouahed, BAILEY, Shara E., FREIDLINE, Sarah E., NEUBAUER, Simon, SKINNER, Matthew M., BERGMANN, Inga, LE CABEC, Adeline, BENAZZI, Stefano, HARVATI, Katerina and GUNZ, Philipp, 2017. New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of Homo sapiens.

Nature. Online. 7 June 2017. Vol. 546, no. 7657, pp. 289–292. [Accessed 15 January 2023]. DOI 10.1038/NATURE22336.

ICO, 2022. International Coffee Organization - Trade Statistics Tables. Online. 2022. [Accessed 26 August 2022]. Retrieved from: https://www.ico.org/trade_statistics.asp?section=Statistics

IEA, 2017. Technology Roadmap - Delivering Sustainable Bioenergy – Analysis - IEA. *International Energy Agency*. Online. 2017. [Accessed 1 September 2022]. Retrieved from: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-delivering-sustainable-bioenergy>

INTAGUN, Weeranut, KANOKSILAPATHAM, Wirojne, MADEN, Arisa and NOBAEW, Banphot, 2019. Effect of natural additive on pellets physical properties and energy cost. *2019 IEEE 2nd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering, REPE 2019*. 1 November 2019. pp. 130–134. DOI 10.1109/REPE48501.2019.9025154.

JAMES, Steven R., DENNELL, R. W., GILBERT, Allan S., LEWIS, Henry T., GOWLETT, J. A. J., LYNCH, Thomas F., MCGREW, W. C., PETERS, Charles R., POPE, Geoffrey G., STAHL, Ann B. and JAMES, Steven R., 1989. Hominid Use of Fire in the Lower and Middle Pleistocene: A Review of the Evidence [and Comments and Replies]. <https://doi.org/10.1086/203705>. Online. February 1989. Vol. 30, no. 1, pp. 1–26. [Accessed 15 January 2023]. DOI 10.1086/203705.

JÍLEK, František, KUBA, Josef and JÍLKOVÁ, Jaroslava, 1979. The World Inventions in Dates: A Chronological Survey of Significant Events from the History of Creative Technological Work. *Národní Technické Muzeum*. Online. 1979. [Accessed 15 January 2023]. Retrieved from: https://books.google.cz/books/about/The_World_Inventions_in_Dates.html?id=A8ffNwAACAAJ&redir_esc=y

JUTAKRIDSADA, Pasakorn, PRAJAKSUD, Chonticha, KUBOONYA-ARUK, Luksamone, THEERAKULPISUT, Somnuk and KAMWILAISAK, Khanita, 2016. Adsorption characteristics of activated carbon prepared from spent ground coffee. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 1 March 2016. Vol. 18, no. 3, pp. 639–645. DOI 10.1007/S10098-015-1083-X.

- KALIYAN, Nalladurai and VANCE MOREY, R., 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*. 1 March 2009. Vol. 33, no. 3, pp. 337–359. DOI 10.1016/J.BIOMBIOE.2008.08.005.
- KAŽIMIROVA, Viera, KUBIK, Lubomir and MIHINA, Štefan, 2020. Evaluation of Properties of Pellets Made of Swine Manure. *Acta Technologica Agriculturae*. 1 September 2020. Vol. 23, no. 3, pp. 137–143. DOI 10.2478/ATA-2020-0022.
- KELKAR, Shantanu, SAFFRON, Christopher M., CHAI, Li, BOVEE, Jonathan, STUECKEN, Thomas R., GAREDEW, Mahlet, LI, Zhenglong and KRIEGEL, Robert M., 2015. Pyrolysis of spent coffee grounds using a screw-conveyor reactor. *Fuel Processing Technology*. 1 September 2015. Vol. 137, pp. 170–178. DOI 10.1016/J.FUPROC.2015.04.006.
- KHALIL, Usman, BILAL SHAKOOR, Muhammad, ALI, Shafaqat, RIZWAN, Muhammad, NASSER ALYEMENI, Mohammed and WIJAYA, Leonard, 2020. Adsorption-reduction performance of tea waste and rice husk biochars for Cr(VI) elimination from wastewater. *Journal of Saudi Chemical Society*. 1 November 2020. Vol. 24, no. 11, pp. 799–810. DOI 10.1016/J.JSCS.2020.07.001.
- KONDAMUDI, Narasimharao, MOHAPATRA, Susanta K. and MISRA, Mano, 2008. Spent coffee grounds as a versatile source of green energy. *undefined*. 24 December 2008. Vol. 56, no. 24, pp. 11757–11760. DOI 10.1021/JF802487S.
- KOVALCIK, Adriana, OBRUCA, Stanislav and MAROVA, Ivana, 2018. *Valorization of spent coffee grounds: A review*. . 1 July 2018. Institution of Chemical Engineers.
- KRASUCKA, Patrycja, PAN, Bo, SIK OK, Yong, MOHAN, Dinesh, SARKAR, Binoy and OLESZCZUK, Patryk, 2021. Engineered biochar – A sustainable solution for the removal of antibiotics from water. *Chemical Engineering Journal*. 1 February 2021. Vol. 405, pp. 126926. DOI 10.1016/J.CEJ.2020.126926.
- LEE, Kuan Ting, DU, Jyun Ting, CHEN, Wei Hsin, UBANDO, Aristotle T. and LEE, Keat Teong, 2021. Green additive to upgrade biochar from spent coffee grounds by torrefaction for pollution mitigation. *Environmental Pollution*. 15 September 2021. Vol. 285. DOI 10.1016/j.envpol.2021.117244.
- LEHMANN, Johanne and JOSEPH, Stephen, 2015. Biochar for environmental management: an introduction (pp. 33-46). in Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. *Biochar for Environmental*

Management. Online. 2015. pp. 33–46. [Accessed 26 August 2022]. Retrieved from: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203762264-8/biochar-environmental-management-introduction-johannes-lehmann-stephen-joseph>

LEONI, Elena, MANCINI, Manuela, AMINTI, Giovanni and PICCHI, Gianni, 2021. Wood fuel procurement to bioenergy facilities: Analysis of moisture content variability and optimal sampling strategy. *Processes*. 1 February 2021. Vol. 9, no. 2, pp. 1–14. DOI 10.3390/PR9020359.

LESSA, Emanuele F., NUNES, Matheus L. and FAJARDO, André R., 2018. Chitosan/waste coffee-grounds composite: An efficient and eco-friendly adsorbent for removal of pharmaceutical contaminants from water. *Carbohydrate Polymers*. 1 June 2018. Vol. 189, pp. 257–266. DOI 10.1016/J.CARBPOL.2018.02.018.

LESY ČR, 2022. O dřevě | Lesy České republiky, s. p. Online. 2022. [Accessed 30 September 2022]. Retrieved from: <https://lesy-cr.cz/drevo/>

LEVY, David, REINECKE, Juliane and MANNING, Stephan, 2016. The Political Dynamics of Sustainable Coffee: Contested Value Regimes and the Transformation of Sustainability. *Journal of Management Studies*. 1 May 2016. Vol. 53, no. 3, pp. 364–401. DOI 10.1111/JOMS.12144.

LIANG, Long, RIDOUTT, Bradley G., WANG, Liyuan, XIE, Bin, LI, Minghong and LI, Zhongbai, 2021. China's Tea Industry: Net Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Potential. *Agriculture 2021*, Vol. 11, Page 363. Online. 16 April 2021. Vol. 11, no. 4, pp. 363. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.3390/AGRICULTURE11040363.

LIU, Zhijia, MI, Bingbing, JIANG, Zehui, FEI, Benhua, CAI, Zhiyong and LIU, Xing'e, 2016. Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. *Renew Energy*. 1 February 2016. Vol. 86, pp. 1–7. DOI 10.1016/j.renene.2015.08.011.

LUBWAMA, Michael and YIGA, Vianney Andrew, 2017. Development of groundnut shells and bagasse briquettes as sustainable fuel sources for domestic cooking applications in Uganda. *Renewable Energy*. 1 October 2017. Vol. 111, pp. 532–542. DOI 10.1016/J.RENENE.2017.04.041.

LUBWAMA, Michael and YIGA, Vianney Andrew, 2018. Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. *Renewable Energy*. 1 April 2018. Vol. 118, pp. 43–55. DOI 10.1016/J.RENENE.2017.11.003.

- MA, Zhongqing, YANG, Youyou, MA, Qianqiang, ZHOU, Hanzhi, LUO, Xiping, LIU, Xiaohuan and WANG, Shurong, 2017. Evolution of the chemical composition, functional group, pore structure and crystallographic structure of bio-char from palm kernel shell pyrolysis under different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1 September 2017. Vol. 127, pp. 350–359. DOI 10.1016/J.JAAP.2017.07.015.
- MA, Zhongqing, ZHANG, Yu, SHEN, Yunfang, WANG, Junhao, YANG, Youyou, ZHANG, Wenbiao and WANG, Shurong, 2019. Oxygen migration characteristics during bamboo torrefaction process based on the properties of torrefied solid, gaseous, and liquid products. *Biomass and Bioenergy*. 1 September 2019. Vol. 128. DOI 10.1016/J.BIOMBIOE.2019.105300.
- MAGDZIARZ, Aneta, WILK, Małgorzata and STRAKA, Robert, 2017. Combustion process of torrefied wood biomass. *J Therm Anal Calorim*. 1 February 2017. Vol. 127, no. 2, pp. 1339–1349. DOI 10.1007/s10973-016-5731-0.
- MALARA, Angela, PAONE, Emilia, FRONTERA, Patrizia, BONACCORSI, Lucio, PANZERA, Giuseppe and MAURIELLO, Francesco, 2018. Sustainable exploitation of coffee silverskin in water remediation. *Sustainability (Switzerland)*. 3 October 2018. Vol. 10, no. 10. DOI 10.3390/SU10103547.
- MALATĚÁK, Jan, GENDEK, Arkadiusz, ANISZEWSKA, Monika and VELEBIL, Jan, 2020. Emissions from combustion of renewable solid biofuels from coniferous tree cones. *Fuel*. 15 September 2020. Vol. 276, pp. 118001. DOI 10.1016/J.FUEL.2020.118001.
- MALATĚÁK, Jan, VELEBIL, Jan, BRADNA, Jiří, GENDEK, Arkadiusz and TAMELOVÁ, Barbora, 2020. *Evaluation of Co and NoxEmissions in Real-Life Operating Conditions of Herbaceous Biomass Briquettes Combustion*. . 1 June 2020. Sciendo.
- MANYUCHI, M M, MBOHWA, C and MUZENDA, E, 2018. Biogas and Bio solids Production from Tea Waste through Anaerobic Digestion. . 2018.
- MATA, Teresa M., MARTINS, António A. and CAETANO, Nídia S., 2018. Bio-refinery approach for spent coffee grounds valorization. *Bioresource Technology*. 1 January 2018. Vol. 247, pp. 1077–1084. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2017.09.106.
- MAYSON, S. and WILLIAMS, I. D., 2021. Applying a circular economy approach to valorize spent coffee grounds. *Resources, Conservation and Recycling*. 1 September 2021. Vol. 172. DOI 10.1016/j.resconrec.2021.105659.

MCCAFFREY, Zach, TORRES, Lennard, CHIOU, Bor sen, FERREIRA, Saulo Rocha, SILVA, Luiz Eduardo, WOOD, Delilah F. and ORTS, William John, 2021. Torrefaction of Almond and Walnut Byproducts. *Frontiers in Energy Research*. 22 March 2021. Vol. 9, pp. 91. DOI 10.3389/FENRG.2021.643306/XML/NLM.

MCNUTT, Josiah and HE, Quan (Sophia), 2019. *Spent coffee grounds: A review on current utilization*. . 25 March 2019. Korean Society of Industrial Engineering Chemistry.

MEDIC, D., DARR, M., SHAH, A., POTTER, B. and ZIMMERMAN, J., 2012. Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. *Fuel*. 1 January 2012. Vol. 91, no. 1, pp. 147–154. DOI 10.1016/J.FUEL.2011.07.019.

MELKIOR, T., JACOB, S., GERBAUD, G., HEDIGER, S., LE PAPE, L., BONNEFOIS, L. and BARDET, M., 2012. NMR analysis of the transformation of wood constituents by torrefaction. *Fuel*. 1 February 2012. Vol. 92, no. 1, pp. 271–280. DOI 10.1016/J.FUEL.2011.06.042.

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2021. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší. *Sbírka zákonů*. Online. 2021. [Accessed 15 January 2023]. Retrieved from: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201/zneni-20220701>

MIZUNO, Satoru, IDA, Tamio, FUCHIHATA, Manabu and NAMBA, Kunihiko, 2016. Effect of specimen size on ultimate compressive strength of Bio-coke produced from green tea grounds. *undefined*. 2016. Vol. 3, no. 1, pp. 15- 00441-15–00441. DOI 10.1299/MEJ.15-00441.

MOHAMMAD, Sharifah, BAIDURAH, Siti, KAMIMURA, Naofumi, MATSUDA, Seitaro, ABU BAKAR, Nurul Alia Syufina, MUHAMAD, Nik Nur Izzati, AHMAD, Aizat Hisham, DOMINIC, Debbie and KOBAYASHI, Takaomi, 2021. Fermentation of Palm Oil Mill Effluent in the Presence of *Lysinibacillus* sp. LC 556247 to Produce Alternative Biomass Fuel. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 11915*. Online. 28 October 2021. Vol. 13, no. 21, pp. 11915. [Accessed 10 September 2022]. DOI 10.3390/SU132111915.

MOHD FUAD, Muhammad Ariff Hanaffi, HASAN, Mohd Faizal and ANI, Farid Nasir, 2019. Microwave torrefaction for viable fuel production: A review on theory, affecting factors, potential and challenges. *Fuel*. Online. 1 October 2019. Vol. 253, pp. 512–526. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.1016/J.FUEL.2019.04.151.

- MUKHERJEE, Alivia, BORUGADDA, Venu Babu, DYNES, James J., NIU, Catherine and DALAI, Ajay K., 2021. Carbon dioxide capture from flue gas in biochar produced from spent coffee grounds: Effect of surface chemistry and porous structure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1 October 2021. Vol. 9, no. 5. DOI 10.1016/j.jece.2021.106049.
- MUSSATTO, Solange I., MACHADO, Ercília M.S., MARTINS, Silvia and TEIXEIRA, J. A., 2011. Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food and Bioprocess Technology*. July 2011. Vol. 4, no. 5, pp. 661–672. DOI 10.1007/S11947-011-0565-Z.
- MŽP, 2018. Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. *Sbírka zákonů Ministerstva životního prostředí*. 2018.
- NAG CHAUDHURI, A. K., KARMAKAR, Sanmoy, ROY, Dilip, PAL, Siddhartah, PAL, Mintu and SEN, Tuhinadri, 2005. Anti-inflammatory activity of Indian black tea (Sikkim variety). *Pharmacological research*. Online. February 2005. Vol. 51, no. 2, pp. 169–175. [Accessed 28 August 2022]. DOI 10.1016/J.PHRS.2004.07.008.
- OBROUČKA, Karel, 2000. Termické odstraňování a energetické využití odpadů. . 2000. pp. 143.
- OKEDU, K., ALSENAIDI, Abdulaziz Salem, HAJRI, Imaduddin al, RASHDI, Issa al and SALMANI, Waleed al, 2020. Real Time Dynamic Analysis of Solar PV Integration for Energy Optimization. *undefined*. 2020. DOI 10.20508/IJSMARTGRID.V4I2.100.G91.
- OLDFIELD, Thomas L., SIKIRICA, Nataša, MONDINI, Claudio, LÓPEZ, Guadalupe, KUIKMAN, Peter J. and HOLDEN, Nicholas M., 2018. Biochar, compost and biochar-compost blend as options to recover nutrients and sequester carbon. *Journal of environmental management*. Online. 15 July 2018. Vol. 218, pp. 465–476. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.1016/J.JENVMAN.2018.04.061.
- ONLINE ETYMOLOGY DICTIONARY, 2015. coffee | Etymology, origin and meaning of coffee by etymonline. Online. 2015. [Accessed 1 October 2022]. Retrieved from: <https://www.etymonline.com/word/coffee>
- OXFORD ENGLISH DICTIONARY, 1893. A New English Dictionary on Historical Principles: Founded Mainly on the Materials Collected by the Philological Society: James A. H. Murray : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive. Vol. 2

(1st ed.). Online. 1893. [Accessed 30 September 2022]. Retrieved from: <https://archive.org/details/oed02arch/page/588/mode/2up?view=theater>

ÖZARSLAN, Saliha, ABUT, Serdar, ATELGE, M. R., KAYA, M. and UNALAN, S., 2021. Modeling and simulation of co-digestion performance with artificial neural network for prediction of methane production from tea factory waste with co-substrate of spent tea waste. *Fuel*. 15 December 2021. Vol. 306. DOI 10.1016/j.fuel.2021.121715.

PEFC, 2022. PEFC - Programme for the Endorsement of Forest Certification. Online. 2022. [Accessed 30 September 2022]. Retrieved from: <https://www.pefc.org/>

PENG, Nana, LIU, Zhengang, LIU, Tingting and GAI, Chao, 2016. Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) during hydrothermally treated municipal solid waste combustion for energy generation. *Applied Energy*. 15 December 2016. Vol. 184, pp. 396–403. DOI 10.1016/J.APENERGY.2016.10.028.

PFLUGER, R.A., 1975. Soluble coffee processing. *Solid Wastes Origin Collection Processing & Disposal*. C.I. Mantell. Online. 1975. [Accessed 26 August 2022]. DOI 10.3/JQUERY-UIJS.

PHANPHANICH, Manunya and MANI, Sudhagar, 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*. January 2011. Vol. 102, no. 2, pp. 1246–1253. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2010.08.028.

PIMCHUAI, Anuphon, DUTTA, Animesh and BASU, Prabir, 2010. Torrefaction of Agriculture Residue To Enhance Combustible Properties. *Energy & Fuels*. Online. 2010. Vol. 24, no. 9, pp. 4638–4645. [Accessed 30 September 2022]. Retrieved from: https://www.academia.edu/66720012/Torrefaction_of_Agriculture_Residue_To_Enhance_Combustible_Properties_

PUA, Fei Ling, SUBARI, Mohamad Syahmi, EAN, Lee Woen and KRISHNAN, Shamala Gowri, 2020. Characterization of biomass fuel pellets made from Malaysia tea waste and oil palm empty fruit bunch. *Materials Today: Proceedings*. Online. 1 January 2020. Vol. 31, pp. 187–190. [Accessed 28 August 2022]. DOI 10.1016/J.MATPR.2020.02.218.

PUJOL, D., LIU, C., GOMINHO, J., OLIVELLA, M. À, FIOL, N., VILLAESCUSA, I. and PEREIRA, H., 2013. The chemical composition of exhausted coffee waste. *Industrial Crops and Products*. October 2013. Vol. 50, pp. 423–429. DOI 10.1016/j.indcrop.2013.07.056.

PUROHIT, Pallav and CHATURVEDI, Vaibhav, 2018. Biomass pellets for power generation in India: a techno-economic evaluation. *Environmental Science and Pollution Research*. Online. 1 October 2018. Vol. 25, no. 29, pp. 29614–29632. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.1007/S11356-018-2960-8/FIGURES/11.

QIN, Yu hong, HAN, Qing qing, ZHAO, Zi bing, DU, Zhen yi, FENG, Jie, LI, Wen ying, VASSILEV, Stanislav v. and VASSILEVA, Christina G., 2017. Impact of biomass addition on organic structure and mineral matter of char during coal-biomass co-gasification under CO₂ atmosphere. *Fuel*. 15 August 2017. Vol. 202, pp. 556–562. DOI 10.1016/J.FUEL.2017.04.072.

RAJESH BANU, J., KAVITHA, S., YUKESH KANNAH, R., DINESH KUMAR, M., PREETHI, ATABANI, A. E. and KUMAR, Gopalakrishnan, 2020. Biorefinery of spent coffee grounds waste: Viable pathway towards circular bioeconomy. *Bioresource Technology*. 1 April 2020. Vol. 302. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2020.122821.

RAJESH BANU, J., YUKESH KANNAH, R., DINESH KUMAR, M., PREETHI, KAVITHA, S., GUNASEKARAN, M., ZHEN, Guangyin, AWASTHI, Mukesh Kumar and KUMAR, Gopalakrishnan, 2021. Spent coffee grounds based circular bioeconomy: Technoeconomic and commercialization aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 December 2021. Vol. 152. DOI 10.1016/j.rser.2021.111721.

RAWAT, Jyoti, SAXENA, Jyoti and SANWAL, Pankaj, 2019. Biochar: A Sustainable Approach for Improving Plant Growth and Soil Properties. *Biochar - An Imperative Amendment for Soil and the Environment*. Online. 8 January 2019. [Accessed 26 August 2022]. DOI 10.5772/INTECHOPEN.82151.

RICHELLE, Myriam, TAVAZZI, Isabelle and OFFORD, Elizabeth, 2001. Comparison of the antioxidant activity of commonly consumed polyphenolic beverages (coffee, cocoa, and tea) prepared per cup serving. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Online. 2001. Vol. 49, no. 7, pp. 3438–3442. [Accessed 26 August 2022]. DOI 10.1021/JF0101410.

RONDON, Marco A, LEHMANN, Johannes, RAMÍREZ, Juan and HURTADO, Maria, 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils*. 2007. Vol. 43, pp. 699–708. DOI 10.1007/s00374-006-0152-z.

RUDOLFSSON, Magnus, STELTE, Wolfgang and LESTANDER, Torbjörn Albert, 2015. Process optimization of combined biomass torrefaction and pelletization for fuel

pellet production – A parametric study. *Applied Energy*. 15 February 2015. Vol. 140, pp. 378–384. DOI 10.1016/J.APENERGY.2014.11.041.

SCHMIDT, Hans Peter, BUCHELI, Thomas and KAMMANN, Claudia, 2012. The European Biochar Certificate (EBC). *Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.* European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. Version 9.5E of 1st August 2021. Online. 2012. [Accessed 13 September 2022]. Retrieved from: <https://www.european-biochar.org/en>

SEN, Khok Yong and BAIDURAH, Siti, 2021. Renewable biomass feedstocks for production of sustainable biodegradable polymer. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 1 February 2021. Vol. 27, pp. 100412. DOI 10.1016/J.COGSC.2020.100412.

SERMYAGINA, Ekaterina, MENDOZA MARTINEZ, Clara Lisseth, NIKKU, Markku and VAKKILAINEN, Esa, 2021. Spent coffee grounds and tea leaf residues: Characterization, evaluation of thermal reactivity and recovery of high-value compounds. *Biomass and Bioenergy*. 1 July 2021. Vol. 150, pp. 106141. DOI 10.1016/J.BIOMBIOE.2021.106141.

SHEIKHZADEH, Najmeh, NOFOUZI, Katayoon, DELAZAR, Abbas and OUSHANI, Ali Khani, 2011. Immunomodulatory effects of decaffeinated green tea (*Camellia sinensis*) on the immune system of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Fish and Shellfish Immunology*. 2011. Vol. 31, no. 6, pp. 1268–1269. DOI 10.1016/j.fsi.2011.09.010.

SILVA, M. A., NEBRA, S. A., MACHADO SILVA, M. J. and SANCHEZ, C. G., 1998. The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee industry. *Biomass and Bioenergy*. Online. May 1998. Vol. 14, no. 5–6, pp. 457–467. [Accessed 26 August 2022]. DOI 10.1016/S0961-9534(97)10034-4.

SKANDEROVÁ, K, MALAŤÁK, J and BRADNA, J, 2015. Energy use of compost pellets for small combustion plants. *Agronomy Research*. 2015. Vol. 13, no. 2, pp. 413–419.

SOUČEK, Jiří, JASINSKAS, Algirdas, SILLINGER, Fanni and SZALAY, Kornél, 2019. Determination of Mechanical and Energetic Properties of Reed Canary Grass Pellets Production. <http://acta.mendelu.cz/doi/10.11118/actaun201967030757.html>. Online. 27 June 2019. Vol. 67, no. 3, pp. 757–762. [Accessed 30 September 2022]. DOI 10.11118/ACTAUN201967030757.

- SPOKAS, Kurt A., NOVAK, Jeff M. and VENTEREA, Rodney T., 2012. Biochar's role as an alternative N fertilizer: ammonia capture. *Plant Soil*. January 2012. Vol. 350, no. 1–2, pp. 35–42. DOI 10.1007/s11104-011-0930-8.
- STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2021. Full report – Statistical Review of World Energy 2021. . 2021.
- STELTE, Wolfgang, CLEMONS, Craig, HOLM, Jens K., SANADI, Anand R., AHRENFELDT, Jesper, SHANG, Lei and HENRIKSEN, Ulrik B., 2011. Pelletizing properties of torrefied spruce. *Biomass and Bioenergy*. 1 November 2011. Vol. 35, no. 11, pp. 4690–4698. DOI 10.1016/J.BIOMBIOE.2011.09.025.
- TAMELOVÁ, B., MALAŤÁK, J. and VELEBIL, J., 2018. Energy valorisation of citrus peel waste by torrefaction treatment. *Agronomy Research*. 2018. Vol. 16, no. 1, pp. 276–285. DOI 10.15159/AR.18.029.
- TAMELOVÁ, Barbora, MALAŤÁK, Jan, VELEBIL, Jan, GENDEK, Arkadiusz and ANISZEWSKA, Monika, 2021. Energy utilization of torrefied residue from wine production. *Materials*. 1 April 2021. Vol. 14, no. 7. DOI 10.3390/MA14071610.
- TAO, Mei Lin, GUAN, Hong Yu, WANG, Xiao Hong, LIU, Yi Chun and LOUH, Rong Fuh, 2015. Fabrication of sulfonated carbon catalyst from biomass waste and its use for glycerol esterification. *Fuel Processing Technology*. 1 October 2015. Vol. 138, pp. 355–360. DOI 10.1016/J.FUPROC.2015.06.021.
- TEHRANI, Nima Fotouhi, AZNAR, Javier S. and KIROS, Yohannes, 2015. Coffee extract residue for production of ethanol and activated carbons. *Journal of Cleaner Production*. 15 March 2015. Vol. 91, pp. 64–70. DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2014.12.031.
- UJJINAPPA, Santhosh and SREEPATHI, Lingadhalli Krishnamurthy, 2018. Evaluation of Physico-Mechanical-Combustion Characteristics of Fuel Briquettes made from blends of Areca Nut Husk, Simarouba Seed Shell and Black Liquor. *International Journal of Renewable Energy Development*. Online. 10 July 2018. Vol. 7, no. 2, pp. 131–137. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.14710/IJRED.7.2.131-137.
- USLU, Ayla, FAAIJ, André P.C. and BERGMAN, P. C.A., 2008. Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*. 1 August 2008. Vol. 33, no. 8, pp. 1206–1223. DOI 10.1016/J.ENERGY.2008.03.007.

VASSILEV, Stanislav v., BAXTER, David, ANDERSEN, Lars K. and VASSILEVA, Christina G., 2010. An Overview of the Chemical Composition of Biomass. *Fuel*. Online. May 2010. Vol. 89, no. 5, pp. 913–933. [Accessed 26 August 2022]. DOI 10.1016/J.FUEL.2009.10.022.

VIVEK, Voora, 2019. Global Market Report: Tea | International Institute for Sustainable Development. Online. 2019. [Accessed 1 October 2022]. Retrieved from: <https://www.iisd.org/publications/report/global-market-report-tea>

WANG, Shurong, DAI, Gongxin, RU, Bin, ZHAO, Yuan, WANG, Xiaoliu, XIAO, Gang and LUO, Zhongyang, 2017. Influence of torrefaction on the characteristics and pyrolysis behavior of cellulose. *Energy*. 1 February 2017. Vol. 120, pp. 864–871. DOI 10.1016/J.ENERGY.2016.11.135.

WANG, Shurong, DAI, Gongxin, YANG, Haiping and LUO, Zhongyang, 2017. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017. Vol. 62, pp. 33–86. DOI 10.1016/J.PECS.2017.05.004.

WANG, Shurong, LIN, Haizhou, ZHANG, Li, DAI, Gongxin, ZHAO, Yuan, WANG, Xiaoliu and RU, Bin, 2016. Structural Characterization and Pyrolysis Behavior of Cellulose and Hemicellulose Isolated from Softwood *Pinus armandii* Franch. *Energy and Fuels*. 21 July 2016. Vol. 30, no. 7, pp. 5721–5728. DOI 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.6B00650.

WANG, Xuebin, TAN, Houzhang, NIU, Yanqing, POURKASHANIAN, Mohamed, MA, Lin, CHEN, Erqiang, LIU, Yang, LIU, Zhengning and XU, Tongmo, 2011. Experimental investigation on biomass co-firing in a 300 MW pulverized coal-fired utility furnace in China. *Proc Combust Inst*. 2011. Vol. 32, no. 2, pp. 2725–2733. DOI 10.1016/j.proci.2010.06.055.

WANG, Yan, YIN, Renzhan and LIU, Ronghou, 2014. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 1 November 2014. Vol. 110, no. 1, pp. 375–381. DOI 10.1016/J.JAAP.2014.10.006.

WANG, Zhipu, XIE, Like, LIU, Kai, WANG, Jian, ZHU, Henan, SONG, Qiang and SHU, Xinqian, 2019. Co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks. *Waste Management*. 15 April 2019. Vol. 89, pp. 430–438. DOI 10.1016/J.WASMAN.2019.04.033.

WILK, Małgorzata, MAGDZIARZ, Aneta, KALEMBA, Izabela and GARA, Paweł, 2016. Carbonisation of wood residue into charcoal during low temperature process. *Renewable Energy*. 1 January 2016. Vol. 85, pp. 507–513. DOI 10.1016/J.RENENE.2015.06.072.

XIE, Tao, REDDY, Krishna R., WANG, Chengwen, YARGICOGLU, Erin and SPOKAS, Kurt, 2015. Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 3 May 2015. Vol. 45, no. 9, pp. 939–969. DOI 10.1080/10643389.2014.924180.

XU, Jingyi, WANG, Mei, ZHAO, Jianping, WANG, Yan Hong, TANG, Qian and KHAN, Ikhlas A., 2018. Yellow tea (*Camellia sinensis* L.), a promising Chinese tea: Processing, chemical constituents and health benefits. *Food Research International*. 1 May 2018. Vol. 107, pp. 567–577. DOI 10.1016/j.foodres.2018.01.063.

XU, Xiwei, LI, Zonglin and JIANG, Enchen, 2019. Torrefaction performance of camellia shell under pyrolysis gas atmosphere. *Bioresource Technology*. 1 July 2019. Vol. 284, pp. 178–187. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2019.03.091.

YAN, Beibei, JIAO, Ligu, LI, Jian, ZHU, Xiaochao, AHMED, Sarwaich and CHEN, Guanyi, 2021. Investigation on microwave torrefaction: Parametric influence, TG-MS-FTIR analysis, and gasification performance. *undefined*. 1 April 2021. Vol. 220. DOI 10.1016/J.ENERGY.2021.119794.

YANG, Haiping, YAN, Rong, CHEN, Hanping, LEE, Dong Ho and ZHENG, Chuguang, 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*. 1 August 2007. Vol. 86, no. 12–13, pp. 1781–1788. DOI 10.1016/J.FUEL.2006.12.013.

YANG, Linxi, HE, Quan (Sophia), HAVARD, Peter, CORSCADDEN, Kenneth, XU, Chunbao (Charles) and WANG, Xuan, 2017. Co-liquefaction of spent coffee grounds and lignocellulosic feedstocks. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 237, pp. 108–121. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2017.02.087.

YU, Kai Ling, SHOW, Pau Loke, ONG, Hwai Chyuan, LING, Tau Chuan, CHI-WEI LAN, John, CHEN, Wei Hsin and CHANG, Jo Shu, 2017. Microalgae from wastewater treatment to biochar – Feedstock preparation and conversion technologies. *Energy Conversion and Management*. 15 October 2017. Vol. 150, pp. 1–13. DOI 10.1016/J.ENCONMAN.2017.07.060.

ZHANG, Jing and GUO, Yuming, 2014. Physical properties of solid fuel briquettes made from *Caragana korshinskii* Kom. *Powder Technology*. 2014. Vol. 256, pp. 293–299. DOI 10.1016/j.powtec.2014.02.025.

ZHAO, Chao, QIAO, Xianliang, CAO, Yan and SHAO, Qianjun, 2017. Application of hydrogen peroxide presoaking prior to ammonia fiber expansion pretreatment of energy crops. *Fuel*. 1 October 2017. Vol. 205, pp. 184–191. DOI 10.1016/J.FUEL.2017.05.073.

ZHENG, Anqing, JIANG, Liqun, ZHAO, Zengli, HUANG, Zhen, ZHAO, Kun, WEI, Guoqiang, WANG, Xiaobo, HE, Fang and LI, Haibin, 2015. Impact of Torrefaction on the Chemical Structure and Catalytic Fast Pyrolysis Behavior of Hemicellulose, Lignin, and Cellulose. *Energy and Fuels*. Online. 17 December 2015. Vol. 29, no. 12, pp. 8027–8034. [Accessed 1 September 2022]. DOI 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.5B01765.

ZHU, Xiefei, LUO, Zejun, DIAO, Rui and ZHU, Xifeng, 2019. Combining torrefaction pretreatment and co-pyrolysis to upgrade biochar derived from bio-oil distillation residue and walnut shell. *Energy Conversion and Management*. 1 November 2019. Vol. 199, pp. 111970. DOI 10.1016/J.ENCONMAN.2019.111970.

ZOHAR, Irit, ALPERSON-AFIL, Nira, GOREN-INBAR, Naama, PRÉVOST, Marion, TÛTKEN, Thomas, SISMA-VENTURA, Guy, HERSHKOVITZ, Israel and NAJORKA, Jens, 2022. Evidence for the cooking of fish 780,000 years ago at Gesher Benot Ya’aqov, Israel. *Nature Ecology & Evolution*. Online. 14 November 2022. [Accessed 15 January 2023]. DOI 10.1038/S41559-022-01910-Z.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vývoj spotřeby energií českých domácností v letech 2010 a 2020 (zdroj: ČSÚ)	2
Obrázek 2: Vývoj spotřeby energií českého průmyslu v letech 2010 a 2020 (zdroj: ČSÚ)	2
Obrázek 3: Rozpad výroby energií v ČR dle vstupu (zdroj: ČSÚ).....	3
Obrázek 4: Horkovzdušná sušička Memmert UF30 (zdroj: webshop.ats-net.com)	25
Obrázek 5: Střížný mlýn Retsch SM 100 (zdroj: verkon.cz).....	26
Obrázek 6: Laboratorní váha Sartorius SP124 S (zdroj: vlastní foto)	26
Obrázek 7: Kalorimetr AC600 (zdroj: vlastní foto).....	27
Obrázek 8: Analyzátor CHN628 (zdroj: vlastní foto).....	28
Obrázek 9: Termogravimetrický analyzátor TGA701 (zdroj: vlastní foto).....	29
Obrázek 10: Šnekový dávkovač se zásobníkem	29
Obrázek 11: Torifikační jednotka	30
Obrázek 12: Porovnání podílu uhlíku s výhřevností materiálu.....	38
Obrázek 13: Přepočítání výhřevnosti paliva podle ČSN 44 1353.....	49
Obrázek 14: Hmotnostní tok paliva s požadovaným tepelným výkonem	50

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled trhu dřív v EU (zdroj: Eurostat).....	5
Tabulka 2: Prvková analýza původního materiálu.....	36
Tabulka 3: Prvková analýza dřevní štěpky a ječmene.....	40
Tabulka 4: Prvková analýza kávové sedliny	42
Tabulka 5: Prvková analýza čajového odpadu.....	43
Tabulka 6: Prvková analýza skořápek vlašského ořechu	45
Tabulka 7: Prvková analýza skořápek pistácie.....	46
Tabulka 8: Prvková analýza skořápek arašídů	47
Tabulka 9: Výhřevnost materiálu, shrnutí	48
Tabulka 10: Emisní koncentrace malého tepelného zařízení (20kW).....	51
Tabulka 11: Emisní koncentrace torifikované dřevní štěpky a ječmene (260kW)	52
Tabulka 12: Emisní koncentrace torifikované kávové sedliny (260kW)	52
Tabulka 13: Emisní koncentrace torifikovaného čajového odpadu (260kW).....	53
Tabulka 14: Emisní koncentrace torifikovaných skořápek vlašského ořechu (260kW) .	54
Tabulka 15: Emisní koncentrace torifikovaných skořápek pistácie (260kW).....	54
Tabulka 16: Emisní koncentrace torifikovaných skořápek arašídů (260kW)	55

Přílohy

Příloha A – Článek v časopise *Acta Technologica Agriculturae*

- Spruce and Barley Elemental and Stoichiometric Analysis Affected by the Impact of Pellet Production and Torrefaction

Příloha B – Článek v časopise *Materials*

- Use of Spent Coffee Ground as an Alternative Fuel and Possible Soil Amendment.

Příloha C – Článek v časopise *Materials*

- Properties of Biochar Derived from Tea Waste as an Alternative Fuel and Its Effect on Phytotoxicity of Seed Germination for Soil Applications.

Příloha D – Článek v časopise *Materials*

- Nutshell biochar impact on the environment as an alternative fuel or as a soil applicant