



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV ENERGETICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF ENERGETICAL ENGINEERING

SUŠENÍ BIOMASY

DRYING OF BIOMASS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. JAN GRUBER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. JIŘÍ POSPÍŠÍL, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Gruber

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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

Sušení biomasy

v anglickém jazyce:

Drying of biomass

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je problematika řízeného snižování vlhkosti drobné frakce dřevní hmoty. Porovnány budou různé možnosti realizace sušících linek. Konkrétní návrh sušící linky bude zpracován pro technologii využívající bubnové sušárny s požadovaným sušícím výkonem 300 kg/h.

Cíle diplomové práce:

1. Stručně uveďte význam snižování vlhkosti dřevní biomasy. 2. Zpracujete přehled používaných sušáren pilin.
3. Navrhněte kompletní technologické schéma linky na sušení pilin pro následné peletování (300 kg/h).
4. Navrhněte hlavní rozměry bubnové sušárny pro výkon 300 kg/h dřevních pilin o výstupní vlhkosti 10%. Proved'te související projekční výpočty.
5. Proved'te technicko-ekonomické zhodnocení bubnové sušárny zadaného výkonu.

Seznam odborné literatury:

Míka: Základy chemického inženýrství, SNTL, 1973

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 3.3.2014

L.S.

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

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá sušením biomasy, především sušením drobné dřevní hmoty. Porovnány jsou různé metody sušení jako je pásové sušení, fluidní sušení a bubnové sušení společně s jejich výhodami a nevýhodami. Je navrženo základní technologické schéma sušící linky. V poslední části práce je zpracován výpočet bubnové sušárny zadaného výkonu a je provedena ekonomická rozvaha.

Abstract

This thesis deals with the drying of biomass, especially drying of small wood mass. The various drying methods, such as belt drying, fluidized bed drying and drum drying are compared including their advantages and disadvantages. It is suggested basic technological scheme of drying line. The last part of the thesis deals with a calculation of drum dryer of specified performance and economic balance is made.

Klíčová slova

peletky, sušení, biomasa, bubnová sušárna, peletovací linka

Key words

pellets, drying, biomass, drum dryer, pelleting line



Bibliografická citace vlastní práce

GRUBER, J. *Sušení biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 62 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří pospíšil, Ph.D.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Sušení biomasy* samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D. Vycházel jsem ze svých znalostí a odborných konzultací a z literatury uvedené v Seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 29. května 2014

.....



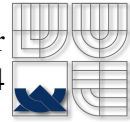
Poděkování

Na tomto místě bych chtěl velice rád poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za zájem a čas, který věnoval mé práci.

Mé poděkování rovněž patří rodině, mým blízkým za velkou podporu, bez které by tato práce nemohla vzniknout.

Obsah

1	Úvod	11
2	Biomasa obecně	12
2.1	Definice biomasy	12
2.2	Vznik biomasy	13
2.3	Klasifikace biomasy	14
2.3.1	Klasifikace podle původu energetické biomasy	14
2.3.2	Klasifikace dle obsahu vody [19]	15
3	Palivová biomasa	16
3.1	Základní kvalitativní parametry	16
3.1.1	Výhřevnost	16
3.1.2	Vlhkost	17
3.1.3	Elementární složení hořlaviny	19
3.1.4	Obsah popela	19
3.1.5	Teplota měknutí popelovin	20
3.1.6	Sypná hmotnost	21
3.1.7	Mechanická odolnost	22
3.2	Vliv snížení vlhkosti na kvalitu biomasy	22
3.3	Pelety	23
3.3.1	Energetická bilance výroby pelet	24
4	Metody snižování vlhkosti biomasy	25
4.1	Pasivní sušení	25
4.2	Aktivní sušení	25
4.2.1	Vazby vlhkosti ve dřevě	25
4.3	Rozdělení sušáren	27
4.4	Sušárny pro sušení dřevních pilin	27
4.4.1	Šachtová sesypná sušárna	28
4.4.2	Fluidní sušárna	28
4.4.3	Pneumatická sušárna	29
4.4.4	Pásová sušárna	29



4.4.5 Rotační bubnová sušárna	30
4.4.6 Sušárna s válcovým ložem	32
4.4.7 Rourová sušárna	33
4.4.8 Porovnání vybraných sušáren	34
5 Sušící linka	35
5.1 Požadavky na sušící linku	35
5.2 Základní části sušící linky	35
5.2.1 Horkovzdušný kotel.....	35
5.2.2 Sušárna	36
5.2.3 Šnekový dopravník	36
5.2.4 Odlučovač pevných částic a ventilátor	37
5.2.5 Elektroinstalace a řídicí systém	37
5.2.6 Další příslušenství	37
5.3 Technologické schéma sušárny.....	38
6 Tepelný výpočet bubnové sušárny	39
6.1 Bilance sušených pilin.....	39
6.2 Tepelná bilance sušárny:.....	40
6.3 Vlastnosti paliva.....	41
6.4 Stechiometrie.....	42
6.4.1 objemy vzduchu.....	42
6.4.2 Minimální objemy spalin.....	43
6.4.3 Skutečné objemy spalin	44
6.4.4 Entalpie vzduchu a spalin	45
6.5 Ztráty a účinnost kotle	46
6.5.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích:.....	46
6.5.2 Komínová ztráta	47
6.5.3 Celková účinnost kotle	47
6.6 Množství paliva pro sušení.....	48
6.7 Množství a vlhkost spalin procházející sušárnou	48
6.8 Výpočet rozměrů bubnu sušárny	49



7	Ekonomická rozvaha.....	50
7.1	Technické posouzení samotné sušárny	50
7.2	Ekonomika provozu při zapojení do peletizační linky	50
7.2.1	Požizovací náklady na linku a roční výdaje	50
7.2.2	Příjmy za prodej pelet	52
7.2.3	Celkový finanční tok.....	52
8	závěr.....	53
9	Seznam použité literatury	55
10	Seznam internetových zdrojů.....	56
11	Seznam použitých symbolů a zkratk	58
12	Seznam obrázků	60
13	Seznam tabulek.....	61
14	Seznam příloh	62

1 Úvod

Využití alternativních metod energie a ustupování od tradičních zdrojů energie z fosilních paliv je trend, který v naší společnosti již probíhá delší dobu. Po velkém rozmachu solární energetiky a dalších obnovitelných zdrojů energie se dostává do popředí využití biomasy jako alternativního paliva. A to nejen pro větší elektrárny spalující v současné době hlavně fosilní paliva, ale i pro domácnosti a drobné podniky. Biomasa je jako palivo brána neutrálně vzhledem k emisím oxidu uhličitého. To je dáno tím, že rostliny při svém růstu během procesu fotosyntézy spotřebovávají oxid uhličitý, čímž se tvoří uzavřený koloběh uhlíku mezi atmosférou a živou hmotou.

Pro energetické využití obzvláště některých druhů biomasy je třeba ji upravit do formy, která bude dobře přepravovatelná, energeticky dostatečně vydatná a celkově příjemně použitelná. Tyto kritéria splňují pelety, které se mohou vyrábět z celé řady plodin nebo zemědělských zbytků jejich slisováním.

Důležitou součástí v technologii výroby pelet je sušení, které je hlavním tématem této práce. Ta má za cíl podat přehled o jednotlivých technologiích sušení. Pro vybranou technologii bubnového sušení bude proveden výpočet sušárny zadaného výkonu a její ekonomické zhodnocení.

2 Biomasa obecně

2.1 Definice biomasy

Definice biomasy existuje celá řada. Jako biomasu můžeme v nejširším slova smyslu označit *těla a zbytky všech organismů*. A to bakterií, rostlin, hub, sinic, ale také živočichů. Je to tedy *veškerá organická hmota, která se účastní látkových přeměn na zemi*. Biomasa je považována za obnovitelný zdroj energie. Rozumíme jí pouze materiál, vzniklý činností rostlin a živočichů v geologicky současné době, na rozdíl od fosilních paliv. Ta byla vytvořena taktéž z biologického materiálu, energie se v nich ale akumulovala před dlouhou dobou a jsou řazeny pod neobnovitelné zdroje energie.

Z hlediska legislativního rámce můžeme nalézt celou řadu definic pojmu biomasa. Ty se liší podle toho, pro jaký účel je pojem definován. Níže vypracovaný seznam [2] vychází z české legislativy (zákon č.180/2005, vyhláška č. 502/2005 Sb. a vyhláška č. 482/2005 Sb.) a obsahuje ucelený výčet definic pojmu biomasa jako:

- a) rostlinnou hmotu včetně zbytků rostlin, výrobky z ní, vedlejší a zbytkové produkty z jejího zpracování a z ní vyrobená paliva,
- b) další tuhá, kapalná i plynná paliva vyrobená výlučně z rostlin nebo částí rostlin, s vyloučením rašeliny a rostlin uvedené ve vyhlášce 485/2005 Sb.,
- c) zemědělské meziprodukty z živočišné výroby, vzniklé při chovu hospodářských zvířat, včetně exkrementů,
- d) plynná a kapalná biopaliva vyráběné termickým zplynováním, pyrolýzou nebo jinými fyzikálně chemickými procesy, včetně veškerých meziproduktů, vedlejších a výsledných produktů použitelných jako paliva,
- e) alkoholy vyráběné z biomasy, s vyloučením dřeva a všechny meziprodukty, včetně veškerých meziproduktů, vedlejších a výsledných produktů použitelných jako paliva,
- f) biopaliva vyrobená z biologicky rozložitelných odpadů, včetně kalů z čistíren odpadních vod, v závodech na výrobu papíru a celulózy,
- g) papír, karton a lepenku, pokud nemohou být materiálově využity, tvarovaná paliva z nich vyrobená v podobě briket, pelet atd.,
- h) palivové a použité dřevo a výrobky z něj, s výjimkou dřeva ošetřeného konzervačními a ochrannými prostředky
- i) vytríděný biologicky rozložitelný komunální odpad a biomasa při výrobě bioplynu anareobní digescí

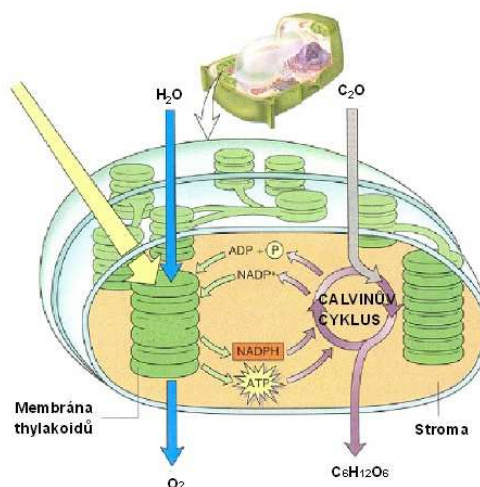
- j) živočišnou hmotu, včetně těl zvířat a jejich částí, dalších živočišných produktů, jenž nejsou určeny k lidské spotřebě, pokud je použita na výrobu bioplynu anaerobní digescí,
- k) biomasu v podobě nevytříděného biologicky rozložitelného odpadu přeměněna v procesech skládkování na bioplyn
- l) biomasu zpracovávaná v procesu čištění odpadních vod a přeměněná samovolně na bioplyn, pokud není přidána jakákoliv další biomasa.

2.2 Vznik biomasy

Hlavním mechanismem vzniku rostlinné biomasy je fotosyntéza. Což je soubor chemických reakcí probíhající v chloroplastech, při kterém organismy vytvářejí svoje stavební organické látky z oxidu uhličitého a vody. energii k syntéze těchto látek získávají pomocí slunečního záření. Při této reakci se tak energie elektromagnetického záření ukládá do chemických vazeb vzniklých organických látek. Celý tento složitý proces lze zapsat jednoduchou rovnicí, na jejíž levé straně jsou chemické sloučeniny vstupující do reakce a a druhé konečné produkty jako:



Samotná chemická reakce probíhá ve dvou fázích. Primární fáze může probíhat výlučně za přítomnosti světla, a proto také nazývá světelná. Zahrnuje reakce spojené s pohlcováním a přeměnou sluneční energie. Dochází při ní ke světelnému rozkladu (fotolýze) vody a tvorbě adenosintrifosfátu. V sekundární (temnostní) fázi dochází k redukci oxidu uhličitého na D-glukosu ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) při využití adenosintrifosfátu. Reakce může probíhat třemi různými způsoby, z nichž nejčastější je calvinův cyklus.



Obr. 1.1: Schéma průběhu fotosyntézy; převzato z [25].

2.3 Klasifikace biomasy

V kapitole 1.1 je uvedeno mnoho různých druhů biomasy z hlediska legislativy, pokud budeme chtít jednotlivé druhy rozdělit do kategorií, nabízí se celá řada kritérií, podle kterých můžeme rozdělení provést.

Jako základní rozdělení veškeré biomasy se nabízí následující jednoduchá klasifikace, která v sobě zahrnuje veškeré druhy považované za biomasu dle legislativy:

- **dendromasa (dřevní biomasa)**
- **fytomasa (biomasa bylinného původu a zemědělská biomasa)**
- **biomasa živočišného původu**
- **biologicky rozložitelné odpady**

2.3.1 Klasifikace podle původu energetické biomasy

Dalším častým způsobem klasifikace, se kterým je možno se setkat v praxi je rozčlenění podle původu hmoty na:

- **zemědělskou biomasu** – zahrnuje veškerou záměrně pěstovanou biomasu, především :
 - *obiloviny*
 - *olejniny*
 - *rychlerostoucí dřeviny*
 - *energetické byliny*
 - *zbytky rostlin ze zemědělské výroby a údržby krajiny*
- **lesní porosty – dendromasa**
 - *palivové dřevo*
 - *zbytky z dřevařského průmyslu*
 - *lesní a těžařské zbytky*
- **zbytkovou biomasu** – zahrnuje celou škálu druhů biomasy, vzniklé hlavně při zpracování primárních rostlinných či živočišných zdrojů biomasy, jako například
 - *biologicky rozložitelné zbytky z průmyslové výroby (výroba buničiny a papíru)*
 - *biologicky rozložitelný komunální odpad*
 - *živočišná biomasa produkovaná chovnými zvířaty*

2.3.2 Klasifikace dle obsahu vody [19]

- **suchá biomasa** – především dřevo a dřevní odpady, sláma, lze ji spalovat přímo nebo po dosušení
- **mokrá biomasa** – tekuté odpady ze živočišné výroby jako je kejda, tekuté komunální odpady, nelze je spalovat, jsou používány v bioplynových stanicích
- **Speciální biomasa** – olejniny, škrobové a cukernaté plodiny, využívané při výrobě bionafty nebo lihu

3 Palivová biomasa

3.1 Základní kvalitativní parametry

Pokud budeme biomasu hodnotit z pohledu energetiky, můžeme na ni k posouzení její kvality aplikovat stejná měřítka jako na tradiční paliva. Mezi ně patří známé veličiny jako výhřevnost, obsah popelovin apod.

Z hlediska posouzení kvality biomasy jako paliva je rovněž třeba zmínit i další vlastnosti, jež sice přímo neovlivňují kvalitu hoření, je na ně ovšem vhodné brát zřetel, protože ovlivňují cenu a náročnost přepravy, či možnost úpravy formy paliva při peletování či briketování atd.

3.1.1 Výhřevnost

Výhřevnost je jednou ze základních a určujících vlastností paliv obecně. Stejně je tomu i u biomasy. Jedná se o teplo vzniklé dokonalým spálením jednoho kilogramu paliva, přičemž voda obsažená ve spalinách je v plynném stavu. Hodnota výhřevnosti je tedy menší než hodnota spalného tepla. A to o teplo, jenž bylo potřeba na přeměnu vody v palivu do plynného stavu. V případě spalného tepla se totiž předpokládá, že se spaliny ohladí až na původní teplotu paliva a voda obsažená ve spalinách zkondenzuje. Hodnota výhřevnosti se tak může v ideálním případě blížit hodnotě spalného tepla.

Hodnoty výhřevnosti u dřevní biomasy (pomíjíme-li tedy vlhkost paliva) se o mnoho neliší (tab 3.1). Různé dřeviny totiž mají při daném obsahu vody prakticky totožné chemické složení hořlaviny. Hodnota výhřevnosti závisí především na podílu *ligninu* s (výhřevností okolo 25 MJ/kg), *celulózy* (asi 19 MJ/kg) a *pryskyřic*. Tyto tři látky tvoří hlavní spalitelné složky v dendromase. Výhřevnost pryskyřic je oproti dřevu asi dvojnásobná a má za následek vyšší výhřevnosti kůry nebo jehličí.

Tab. 3.1: Výhřevnost u různých plodin; převzato z [23]

Plodina (100% sušina)	Výhřevnost [MJ/kg]
Amanathus	16,6
Konopí seté	18,06
Koriandr – celá rostlina	18,88
Křídlatka	19,44
Len – sláma	18,58
Lnička	18,84
Řepka ozimá	16,24
Súdánská tráva – Hyso	18,06
Topol štěpka (různé klony)	18,7 – 19,2
Vrba štěpka (různé klony)	18,2 – 19

3.1.2 Vlhkost

Další velice důležitou vlastností paliva je jeho vlhkost. Biomasa je charakteristická poměrně vysokou a velice proměnlivou vlhkostí podle jejího druhu. Vlhkost biomasy se pohybuje kolem u palivového dřeva v rozmezí 30–50 %. Může ale dosahovat až 60% hranice (ve dřevě ihned po pokácení). Nižší hodnoty vlhkosti má potom palivová biomasa ze zemědělských zdrojů. Srovnání hodnot hlavních druhů biomasy pro energetické účely uvádí tabulka 3.2.

Tab. 3.2: Hodnoty vlhkosti biomasy pro typické zástupce; převzato z [2]

Plodina	Vlhkost [%]
Sláma obilovin	15
Sláma – řepka	17–18
Energetická fytomasa – orná půda	18
Rychlerousoucí dřeviny – zem půda	25–30
Energetické seno	15
Rychleroustoucí dřeviny – antropogenní půda	25–30
Jednoleté rostliny – antropogenní půda	18
Energetické rostliny – antropogenní půda	18

V praxi se používají dva druhy vyjádření vlhkosti. Jedním z nich je uvádění vlhkosti v dřevozpracujícím průmyslu, kde se obsah vody porovnává vzhledem k sušině.

- **výpočet vlhkosti v dřevozpracujícím průmyslu:**

$$w_{dř} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 = \frac{\Delta w}{m_2} 100 [\%]$$

V energetické praxi se potom obsah vody porovnává na rozdíl od předešlého případu vzhledem původnímu vzorku.

- **výpočet vlhkosti v energetice:**

$$w_{en} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100 = \frac{\Delta w}{m_1} 100 [\%]$$

To má za následek různé hodnoty vlhkostí při stejném obsahu vody, jak je uvedeno v tabulce 2.3. Na tuto skutečnost je třeba brát zřetel při posuzování hodnoty vlhkosti.

Tab 3.3: Poměr mezi dřevařskou a energetickou vlhkostí; podle [2]

Energetická vlhkost [%]	Dřevařská vlhkost [%]
0	0
10	11
20	25
30	43
40	67
50	100
60	150
70	230
80	400

Vlhkost biomasy je její zásadní parametr. Jak vyplývá z předchozí kapitoly, roustoucí hodnota vlhkosti zásadně snižuje výhřevnost paliva. Ovlivňuje také průběh hoření, zvyšuje množství vzniklých spalin a s ním spojenou komínovou ztrátu. Vzhledem k těmto faktům je nutné vlhkost biomasy kontrolovat a provést její vysušení až už přirozenými procesy, nebo v sušárnách. A to na hodnotu vhodnou

pro konkrétní technologické zpracování (peletování, briketování), či pro spalování. Vlivem vlhkosti na ostatní parametry biomasy a jejím snižováním se budou podrobněji zabývat další kapitoly.

3.1.3 Elementární složení hořlaviny

Základními prvky hořlaviny jsou uhlík, vodík, síra, kyslík a dusík. Jejich procentuální zastoupení v hořlavině určuje elementární složení hořlaviny. Biomasa obsahuje velké množství prchavé hořlaviny (75–85 %). Ta se uvolňuje se pyrolýzou a nehoří přímo na roštu, ale ve vzhledu mezi roštem a komínem. Tím vzniká pro biomasu charakteristické hoření dlouhým plamenem. Z tohoto důvodu je nutné ji spalovat ve speciálních topeništích zkonstruovaných přímo pro tyto účely. Při spalování biomasy v topeništích pro fosilní paliva se bez jejich dodatečné úpravy setkáváme s nízkou účinností a emisemi.

Další významnou odlišností oproti tradičním fosilním palivům je malý obsah síry ve dřevě, jak je možno vidět v tab. 3.4. To znamená, že během spalování téměř nevznikají emise SO₂.

Tab 3.4: Porovnání elementárního rozboru paliva; převzato z [2]

složka [%]	dřevo			kůra	hnědé uhlí
	jehličnaté	listnaté	smíšené		
uhlík	51	50	50,5	51,4	69,5
vodík	6,2	6,15	6,2	6,1	5,5
kyslík	42,2	43,25	42,7	42,2	23,0
síra	–	–	–	–	1,0
dusík	0,6	0,6	0,6	0,3	1,0
popel v palivu	1,0	1,0	1,0	1,0	25

3.1.4 Obsah popela

Popel je jednou ze tří základních složek tvořících palivo. To je tvořeno vodou, hořlavinou a nespalitelnou složkou, tj. právě popelem. Společně s vodou tvoří nežádoucí složky v palivu, které negativně ovlivňují proces hoření. Obsah popela v biomase se v porovnání s tradičními tuhými fosilními palivy pohybuje na nižší úrovni. U dřeva je to okolo jednoho procenta, v kůře do tří procent. Obsah popeloviny ve dřevě a ostatní biomase je dán přirozeným výskytem minerálů v organické hmotě. Vyšší výskyt popeloviny v kůře je způsoben zanášením různými

látkami z půdy během růstu. Dále také kontaminací během porážení a přemístování dřeva.

Z chemických analýz popela bylo zjištěno, že některé druhy biomasy, zejména slámy v sobě mají obsažen poměrně vysoký podíl alkalických kovů ve srovnání s fosilními palivy. Konkrétně ve formě sloučenin Na_2O , CaO , MgO , K_2O a P_2O_5 [2]. Koncentrace těchto složek jsou uvedeny v tabulce 3.5. Chemické sloužení popelovin má významný vliv na teploty tavení popela.

Tab 3.5: Chemické složení popela; převzato z [2]

sloučenina	Podíl sloučeniny v popelu	
	Pšeničná sláma	Ovesná sláma
CaO	6,57 %	6,9 %
Na_2O	0,56 %	7,52 %
MgO	1,73 %	1,72 %
P_2O_5	2,13 %	1,77 %
SiO_2	51,51 %	16,9 %

3.1.5 Teplota měknutí popelovin

Během procesu hoření dochází ke zvyšování teploty v žárovém lůžku. Proto je zásadní (spolu s obsahem popelovin a jejich složení) znát charakteristické teploty, při nichž dochází ke změnám v jejich struktuře. Změny jsou charakterizovány teplotami deformace, měknutí, tavení, tání a tečení.

Biomasa je charakteristická nízkými teplotami tavení popelovin, což může mít za následek jejich překročení v průběhu hořícího procesu a vede k vytváření usazenin na roštu v ohništi, topeništi a teplosměnných plochách. To má za následek snížení účinnosti kotle, jeho dřívější opotřebení, poruchy, odstávky a zvyšování emisí. Je tedy nutné udržovat teplotu v topeništi pod teplotou tání popelovin, kontrolovat a popřípadě mechanicky odstraňovat vznikající usazeniny.

3.1.6 Sypná hmotnost

Dříve jsme zmínili, že výhřevnost (respektive spalné teplo) vztažené na jednotkovou hmotnost se pro jednotlivé druhy biomasy nemění. Vztáhneme-li však hodnoty výhřevnosti k jednotkovému objemu, situace se změní. Zjistíme, že objem dřevní hmoty potřebný k vývinu daného množství energie se bude značně lišit. To je dáno velkými rozdíly v hustotě jednotlivých druhů dřeva. Pro dopravu materiálu je také důležité, v jaké formě se materiál převáží a kolik krychlových metrů dřevní hmoty je skutečně obsaženo v krychlovém metru např. nákladního automobilu.

Sypná hmotnost charakterizuje palivo právě z tohoto hlediska. Jde o poměr mezi hmotností a prostorem, které palivo zaujímá a uvádí se v jednotkách $[\text{kg}/\text{m}^3]$. U dřevní štěpky ji určíme volným nasypáním do nádoby určených rozměrů. Sypná hmotnost se pohybuje v rozmezí $40 \text{ kg}/\text{m}^3$ u nejlehčích paliv, dřevěné pelety a brikety mají sypnou hmotnost okolo $500 \text{ kg}/\text{m}^3$ [2].



Obr 3.1: Postup při stanovování sypné hmotnosti; převzato z [21]

Pro vyjádření měrné objemové hmotnosti se v dřevařském průmyslu využívají následující objemové jednotky:

- **plnometr (plm)** – představující 1 m^3 zcela vyplněný dřevem
- **prostorový metr (prm)** – prostor o velikosti 1 m^3 vyplněný složeným štípaným dřevem, např. ve formě polen
- **prostorový metr sypaný (prms)** – prostor 1 m^3 materiálu volně sypaného drobného dřeva (štěpky)

Přibližné přepočty mezi jednotkami nám uvádí následující tabulka:

Tab 3.6: Přepočty mezi prostorovými jednotkami; podle [2]

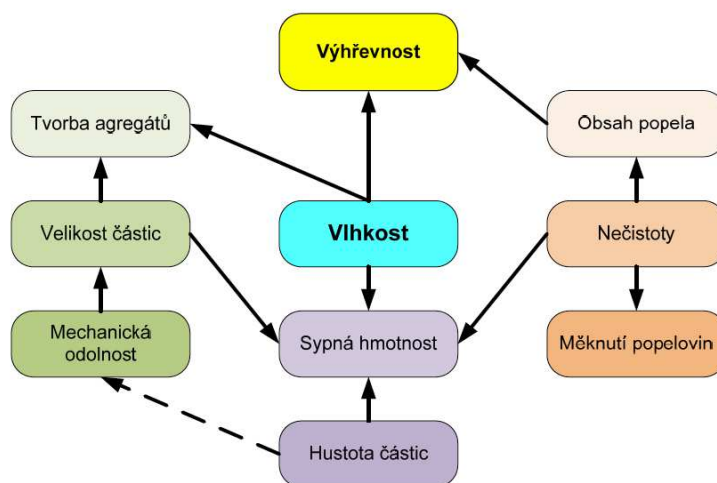
objemová jednotka	plm	prm	prms
plm	1	1,43 – 1,54	2,43 – 2,86
prm	0,65 – 0,7	1	1,61 –
prms	0,35 – 0,41	0,54 – 0,62	1

3.1.7 Mechanická odolnost

Tato vlastnost je důležitá především u nějakým způsobem technologicky zpracovaného paliva, jako jsou pelety a brikety. Dobrá mechanická odolnost pelet je nutná během manipulace a přepravy. Nekvalitně vyrobené pelety či brikety se mohou během procesu dopravy a dávkování do kotlů rozpadat, což vede k uvolňování jemných částic a riziku prachové exploze, tvorbě popílku a nižší účinnosti spalování.

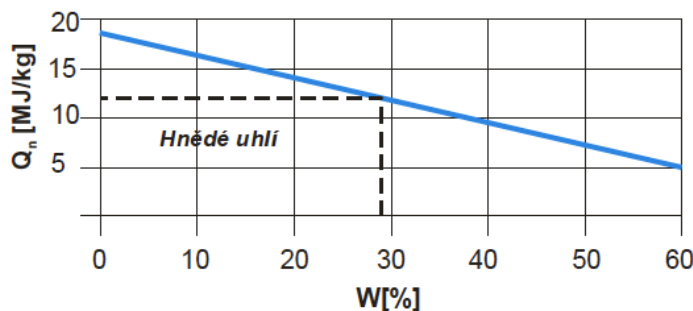
3.2 Vliv snížení vlhkosti na kvalitu biomasy

Vlhkost biomasy má zásadní význam pro její celkovou kvalitu a významně ovlivňuje další vlastnosti paliva. Vzájemné působení sledovaných vlastností názorně ukazuje obr. 3.2.



Obr 3.2: Vliv vlhkosti na ostatní vlastnosti biomasy; převzato z [21]

Zásadní vliv má vlhkost na výhřevnost paliva. Teoretickou závislost výhřevnosti na obsahu vody udává graf na obr. 3.3. Při vlhkosti dřeva 60 % už je výhřevnost tak malá, že nepostačí ani k dostatečnému vývinu tepla pro udržení dostatečné spalovací teploty k souvislému hoření.



Obr 3.3: Závislost výhřevnosti paliva na vlhkosti; převzato z [2]

Vysoká vlhkost ve dřevě má za následek také jeho degradaci vlivem plísní. Přítomnost hub při zvýšené vlhkosti může mít za následek zvýšení rizika samovznícení dřeva. S rostoucí vlhkostí se zvyšuje také sypaná hmotnost a rostou náklady na dopravu a nároky na skladování.

3.3 Pelety

Pelety jsou v současné době vyráběny jednak z odpadu při těžbě a zpracování dřeva, dále potom z cíleně pěstovaných energetických plodin, stébelnin atd. Vykazují dobré vlastnosti při spalování, což umožňuje téměř bezúdržbový provoz v kotlech na biomasu v domácnostech. Peletováním se také značně zvýší energetická hustota oproti surovému dřevu, což znamená snadnější dopravu, manipulaci i nároky na skladovací prostory.

Samotná výroba probíhá na peletovacích lisech. Dřevěné piliny (nebo výchozí surovinu) je nutné nejprve vysušit na vlhkost 10–15 %. Při lisování se piliny protlačují skrze matici. Vznikající teplo při lisování dále zbavuje vznikající pelety vlhkosti. Především ale aktivuje lignin obsažený v pilinách, který se při zahřátí stane plastickým a slouží jako pojivo. Po správném schlazení pelety získají svoji pevnost a charakteristický lesk. Výsledný produkt vychází z lisu ve formě válečků o typickém průměru 6 mm, délce 5–40 mm a má vlhkost okolo 8 %.



Obr 3.4: Peletizace dřevní hmoty; převzato z [18]

Kvalita pelet se posuzuje podle několika norem, německých DIN, DIN plus a rakouské ÖNORM M 7135, v české republice byla upravena pouze vyhláškou 13/2009 Sb. V souvislosti s tím vzniká častý problém s nadsazeným udáváním výhřevnosti, výrobci řídicí se zahraničními normami totiž podle nich uvádějí výhřevnost v bezvodém stavu. Tento problém již řeší norma EN 14961 [18].

3.3.1 Energetická bilance výroby pelet

Jednou z nevýhod peletování je značná energetická náročnost výroby, především sušení. V souvislosti s tím se objevují názory, že energetická náročnost na výrobu pelet z původní suroviny spotřebuje více energie, než je získáno jejím zušlechtěním. Což značně odporuje všeobecnému názoru, podle něhož je na pelety nahlíženo jako na ekologické palivo.

Na příkladu z peletárny Mader z Vrbna pod Pradědem je možno ukázat, že sušení a následné peletování je energeticky výhodné. Vstupní surovinou používanou pro sušení je v peletárně pilina o vlhkosti 50–60 % a výhřevnosti 2 kWh/kg [17]. Výstupní surovinou peleta o výhřevnosti 4,8 kWh/kg. Tabulka 3.7 znázorňuje bilanci, která ukazuje energii spotřebovanou na výrobu 1 kg peletek z pilin na základě dlouhodobého sledování energetických výdajů peletárny.

Tab 3.7: Energetická bilance peletování; podle [17]

vložená energie na 1kg pelet	
1,8 kg pilin k výrobě	$1,8 \times 2 = 3,6 \text{ kWh}$
vysušení pilin	0,52 kWh
el. energie pro výrobní technologie	0,2 kWh
doprava	0,12 kWh
celkové množství energie	4,47 kWh
výhřevnost 1 kg vyrobených pelet	4,8 kWh

4 Metody snižování vlhkosti biomasy

Sušení je jedním ze základních pochodů v chemickém a potravinářském průmyslu, který se ve stále větším množství začíná uplatňovat také v energetice. Sušením rozumíme fyzikální děj, při kterém se účinkem tepla snižuje obsah vody v látce, aniž by se tím měnilo její chemické složení [8]. Při sušení dochází ke změně skupenství odstraňované kapaliny a tím se liší od jiných chemických či mechanických metod odstraňování vody, které za sušení nepovažujeme.

4.1 Pasivní sušení

Pasivní sušení je základním způsobem, jak sušit biomasu. Při tomto způsobu sušení se materiál ponechává volně schnout v místě, kde je chráněn před deštěm a je zajištěno dobré proudění vzduchu. Výhodou tohoto procesu je energetická nenáročnost. Nevýhodou je dlouhá doba sušení a s tím spojené velké nároky na prostor při větším množství sušeného materiálu. Při procesu pasivního sušení můžeme dosáhnout jen určité hraniční vlhkosti materiálu, jejíž velikost se nedostane u dřeva pod 20 % [7]. Tato hodnota v případě dřeva již postačuje k zajištění kvalitního spalování. Ovšem pro jiné úpravy, jako například peletování či briketování je to hodnota stále příliš vysoká. Vlhký materiál rovněž může podléhat, jak bylo řečeno v kap. 2, rychlé degradaci vlivem plísní a hub.

4.2 Aktivní sušení

Pasivní metody sušení nám nemusejí vždy postačovat k zajištění optimální vlhkosti pro požadovanou operaci. Aktivní sušení probíhá v sušárnách. Hlavním rozdílem oproti pasivnímu sušení je přidávaná energie z externího zdroje při procesu sušení. Pomocí toho je možno dosáhnout nižších hodnot vlhkostí materiálu a zkracuje se doba sušení.

4.2.1 Vazby vlhkosti ve dřevě

Rovnovážná vlhkost dřeva

Rovnováha mezi sušeným materiálem a sušícím plynem nastává ve chvíli, kde je parciální tlak par kapaliny v materiálu roven parciálnímu tlaku par v plynu. Tuto závislost popisuje graf na obr. 4.1. Jak je vidět, rovnovážná vlhkost je závislá na relativní vlhkosti okolí a teplotě, mírně se od sebe také liší pro různé druhy dřeva.



Obr 4.1: Grafy rovnovážné vlhkosti dřeva pro různé teploty; převzato z [15]

Dřevo řadíme mezi hygroskopické materiály, což znamená, že mají schopnost pohlcovat ze vzduchu vodní páru.

Vázaná vlhkost

Voda obsažená ve dřevě při vlhkosti do 30 % vyvoluje nižší tlak par než čistá voda při téže teplotě. To znamená, že je zde vlhkost nějakým způsobem vázána. Jde o vlhkost v buněčných stěnách pojená osmotickou vazbou, nebo v chemické vazbě s buničitým materiálem. Vlhkost v podobě vázané vody nemůžeme ze dřeva odstranit mechanicky.

Nevázaná vlhkost

Pokud dojde při daných podmínkách k nasycení buněčných stěn vodou, hovoříme o tzv. bodu nasycení vláken [4]. Dřevo ale může i nadále přijímat vodu a zvyšovat svoji vlhkost. Vodu, kterou takto dále přijme, nazýváme nevázanou nebo volnou. Tato voda je obsažená v cévách a mezibuněčných prostorech. Lze ji ze dřeva odstranit i mechanicky, například lisováním.

Chemická vlhkost

Poslední forma vody ve dřevě je nejobtížněji odstranitelná, jelikož je přímou součástí chemických sloučenin tvořících dřevo. Lze ji odstranit pouze úplným spálením. Její množství se pohybuje v rozmezí 1–2 % ze sušiny.

4.3 Rozdělení sušáren

Vzhledem k rozmanitosti sušených materiálů a požadavkům na sušený materiál existuje celá řada druhů sušáren. Můžeme je dělit podle různých kritérií, základní jsou zmíněny níže [8,9].

- **dle způsobu převládajícího sdílení tepla:**
 - konvekční sušárny
 - indukční sušárny
 - sálavé sušárny
 - dielektrické sušárny
- **dle sušícího média:**
 - teplovzdušné sušárny
 - spalínové sušárny
 - sušárny s inertním plynem
 - sušárny s přehřátou párou
- **dle provozního tlaku:**
 - atmosferické sušárny
 - přetlakové sušárny
 - vakuové sušárny
- **dle charakteru kontaktu sušícího prostředí s materiálem:**
 - fluidní sušárny
 - sušárny s impaktním prouděním
 - pneumatické sušárny
- **dle povahy provozu:**
 - kontinuální sušárny
 - periodické (vsádkové) sušárny

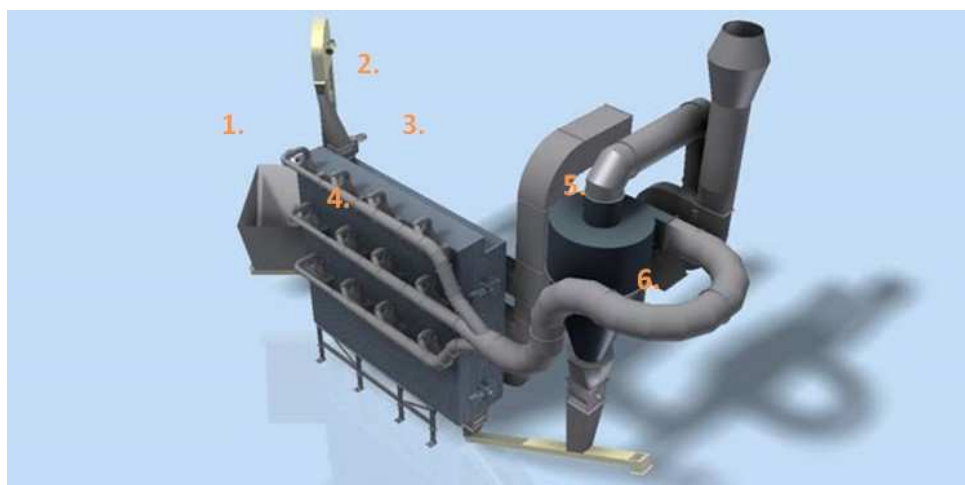
4.4 Sušárny pro sušení dřevních pilin

Pro sušení pilin v dřevařském průmyslu se využívá sušáren pracujících většinou při atmosferickém tlaku, respektive mírném podtlaku. Jako sušící médium jsou využívány spaliny nebo horký vzduch, v menší míře potom přehřátá pára. Přenos tepla je realizován většinou přímo sušícím médiem, jedná se tedy o sušárny konvekční. Nejčastější průmyslově vyráběné a využívané typy jsou popsány níže.

4.4.1 Šachtová sesypaná sušárna

Jedná se o druh sušárny, kde je materiál posouván na základě své potenciální energie. Během sušení tedy dochází k jeho postupnému sesouvání do nižších pater sušárny. Vestavby v sušárně neustále promíchávají materiál, čímž se zvyšuje účinnost sušení a zajišťují rovnoměrné sušení.

Na schématu níže je konkrétní příklad sušárny BCS – 1, která využívá odpadního tepla z kogeneračních jednotek. Kromě pilin je schopna sušit další zemědělské produkty jako seno, obiloviny apod. Šušení probíhá horkým vzduchem ohříváním na chladičích kogenerační linky, jsou také přimíchávány spaliny. Konstrukce sušárny ale umožňuje i připojení na jiný zdroj tepla. Výkon sušárny může být řízen teplotou a množstvím sušeného média a rovněž rychlostí posunu sušících šneků.



Obr 4.2: Schéma šnekové sesypané sušárny; převzato z [12]

Materiál je přes násypku (1.) veden elevátorem (2.) přes turniket (3.) do sušárny (4.) Ta je tvořena soustavou šneků nad sebou. Cyklón (5.) zachytává prachové částice z procesu sušení jenž jsou vedeny do vynášecího šneku (6.). Šnek potom dále přemísťuje usušený materiál ze sušárny.

4.4.2 Fluidní sušárna

Princip sušení ve fluidní sušárně spočívá v profukování vzduchu (nebo jiného sušícího plynu) vrstvou sušeného materiálu rychlostí, při níž dochází k nadzvedávání jednotlivých částic. Sušené médium je přiváděno do tlakových komor umístěných pod sušící plochou a foukáno skrz perforovanou podlahu [8,11]. Výhodou fluidních sušáren je vysoká účinnost daná bezprostředním kontaktem mezi materiálem

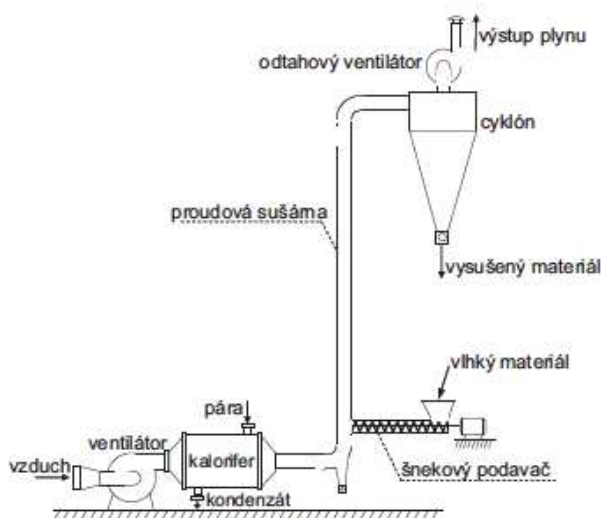
a sušícím médiem. Vzduch nasycený vlhkostí vystupuje ze sušárny při malých rychlostech, což s sebou nese pozitivum – a to minimální unášení prachových částic. Z tohoto důvodu není třeba filtrovat vodní páry.



Obr 4.3: Fluidní sušárna; převzato z [13]

4.4.3 Pneumatická sušárna

Pracuje v kontinuálním režimu v souprůdném uspořádání. Šnekový dopravník dávkuje vlhký materiál, jenž je unášen horkým vzduchem. Rychlost horkého vzduchu udržuje částice materiálu ve visu. V cyklónu potom dochází k oddělení suchého materiálu a samotný vlhký vzduch se odvádí do okolí. Uspořádání i princip sušení je tedy podobný jako u fluidních sušáren

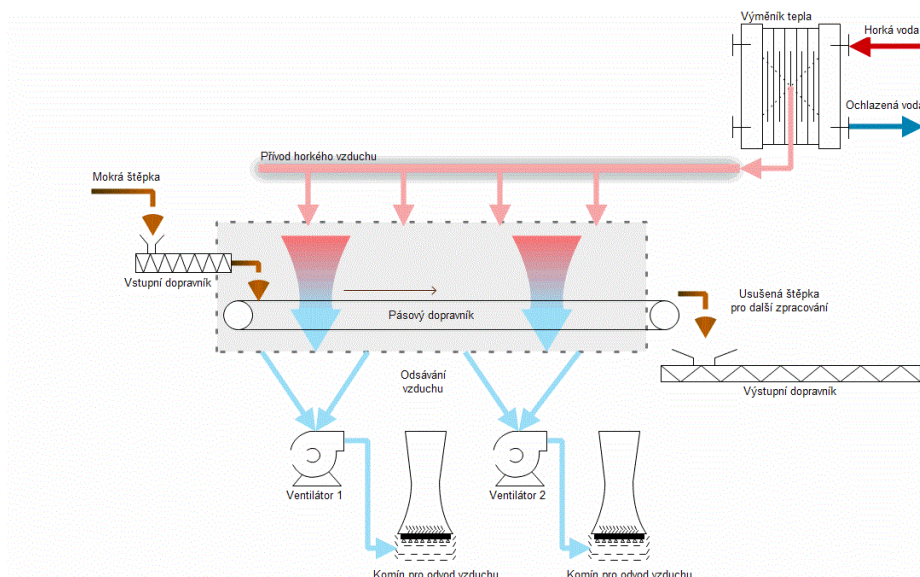


Obr 4.4: Pneumatická sušárna; převzato z [10]

4.4.4 Pásová sušárna

Pásové sušárny jsou v průmyslu spolu s bubnovými nejvíce používané především ve velkých průmyslových provozech. Hlavní součástí je prodyšný sušící pás umístěný na pásovém dopravníku. Dvojice dávkovacích šnekových dopravníků vytváří na pásu souvislou vrstvu sušeného materiálu, která se pomalu posunuje spolu s pásem na konec sušárny.

Sušení probíhá velkým objemem vzduchu při teplotách nižších ve srovnání s bubnovými sušárnami. Teplý vzduch může být přiváděn ze spodní strany sušárny u materiálů s větší vlhkostí. Může být veden i odshora a nasáván ventilátory v dolní části sušárny, to je typické uspořádání pro částečně vysušené materiály (obr. 4.4). Díky tomu je u štěpky či pilin zajištěno, že nedojde k jejímu znehodnocení spálením, nebo přesušením.

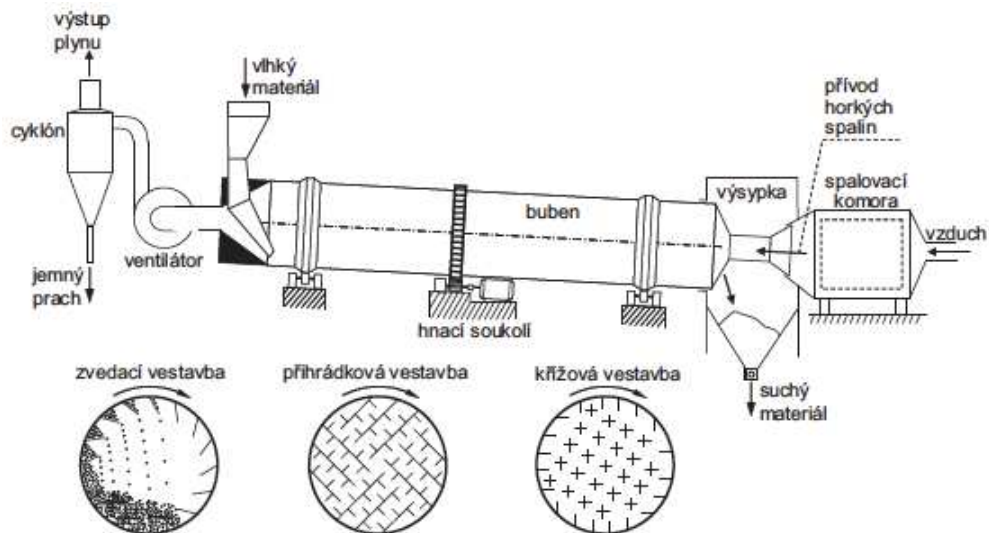


Obr. 4.5: Schéma pásové sušárny; převzato z [14]

4.4.5 Rotační bubnová sušárna

Hlavní částí této sušárny je pomalu rotující (1–15 ot./min) buben, většinou ve svařovaném ocelovém provedení. Buben je umístěný pod mírným sklonem na systému podpěrných vodících kladek. Pohon zajišťuje přes čelní ozubení na vnějším obvodu bubnu prostřednictvím šnekové převodovky, což umožňuje spolu se skloněním postupné přesypávání materiálu směrem na konec bubnu.

Sušení probíhá většinou horkými spaliny z kotle o teplotě 300 až 500 °C. Sušící plyn může proudit v sušárně v protiproudém uspořádání, jak je tomu na obrázku 4.6. U sušených pilin je ale používáno spíše souprůdé uspořádání z důvodu citlivosti pilin na příliš horké spalovací médium.



Obr. 4.6: Schéma bubnové sušárny spolu s ukázkami vestaveb; převzato z [12]

Do bubnu umísťujeme vestavby (nejčastější typy na obr. 4.5), které přesypávají materiál uvnitř bubnu a zvyšují kontaktní plochu sušeného materiálu se spalinami. Spaliny nasycené vlhkostí ze sušeného materiálu je nutné před odvodem do ovzduší zbavit stržených jemných částic prostřednictvím cyklónu.

Bubnové sušárny Briklis BUS:

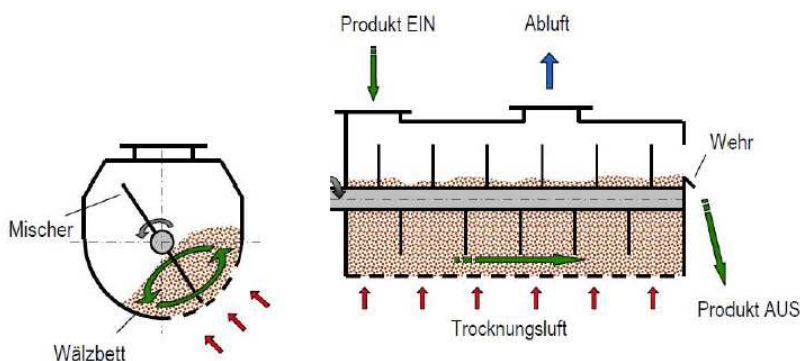
Bubnové sušárny společnosti Briklis spol. s r.o. jsou příkladem průmyslově používaných sušáren s podobným rozsahem výkonnostních parametrů jako je v zadání této práce. Jsou určeny pro střední a větší pily a vhodné pro náročný vícesměnný provoz. Základní technické údaje jsou uvedeny v tabulce, výkonově odpovídá nejvíce zadání práce sušárna BUS 400 se 240 kg/h odpařené vody.

Tab 4.4: Technické parametry sušáren BUS; podle [24]

	BUS 200	BUS 400	BUS 600	BUS 800
spotřeba suroviny 45% vlhkosti	355 kg/h	715 kg/h	1085 kg/hod	1480 kg/h
množství odpařené vody	120 kg/h	240 kg/h	360 kg/h	480 kg/h
množství vst. materiálu s 12%	200 kg/h	400 kg/h	600 kg/h	800 kg/h
převážní rozměry	24 × 2,4 m	24 × 2,4 m	36 × 2,4 m	36 × 2,4 m
potřeba pracovníků	2	2	3	3
elektrický příkon bez drtiče	21 kW	30 kW	50 kW	57 kW

4.4.6 Sušárna s válcovým ložem

Jedná se nový druh sušárny německé firmy Allgaier, která spojuje výhody předešlých typů sušáren. Je vhodná k sušení dřevní stěpky, organických zbytků a odpadů s nepravidelnou strukturou. Jako sušící médium lze využít zbytkové teplo nebo horké spaliny.



Obr. 4.7: Principiální znázornění sušárny s válcovým ložem; podle [15]

Sušení probíhá podle schématu na obr. 4.6, materiál je sušen v relativně vysoké vrstvě, jenž je promíchávána pomalu se otáčejícím míchadlem. Sušící vzduch prostupuje zespodu touto vrstvou a je tím pádem dlouho v kontaktu se sušeným materiálem. Kombinací profukování a pohybu míchadla je materiál transportován napříč proudem vzduchu od vstupu k výstupu, kde vypadává přes nastavitelnou zadržovací klapku [15].

4.4.7 Rourová sušárna

Sušící zóna rourové sušárny je tvořena potrubím, kterým proudí sušený materiál dávkovaný shora na začátku sušárny. Potrubí je vybaveno zpomalovacími difuzory, kterými proudí sušený materiál. Jednotlivé díly jsou spojeny přírubami, což zajišťuje snadnou opravu nebo výměnu dílů. Jako sušící médium slouží spaliny z kotle, který je navržen přímo na míru pro danou sušičku. Pohyb materiálu a sušících spalin je zajištěno ventilátorem poháněným elektromotorem. Sušárna je také vybavena cyklónovým odlučovačem. Sušený materiál je sušárna schopna vysušet na 8–15% vlhkost. Velikost rušených částic by neměla přesahovat délku 5 mm a průměr 3 mm.



Obr. 4.8: Rourová sušárna firmy Avantis partners; převzato z [20]

4.4.8 Porovnání vybraných sušáren

Z předešlých kapitol je patrné, že na trhu existují různá řešení technologie sušení využitelné pro dřevní hmotu, v našem případě konkrétně piliny. Jednotlivé firmy navíc mnohdy umí svou technologii přizpůsobit konkrétním požadavkům zákazníka a umožnit mu úpravou své sušárny. Následující přehled v tabulce uvádí typické výhody a nevýhody tří nejvíce používaných technologií, které mohou pomoci v orientaci a výběru správného typu.

Tab 4.5: Srovnání nejpoužívanějších sušáren.

typ sušárny	výhody	nevýhody
Bubnová sušárna	široký rozsah výkonů, vlastní en. nenáročnost, malá zastavěná plocha, nízké opotřebení	nebezpečí požáru, horší regulace vlhkosti, vznikající emise (nutnost cyklonu)
Pásová sušárna	nízké riziko přesušení, spálení a požáru, nízké emise	typicky dražší než bubnové, rozměrnější, vyšší vlastní spotřeba energie
fluidní sušárna	nejméně náročná na prostor	drahá, náchylná ke korozi, nutný homogenní materiál pro vytvoření fluidní vrstvy

5 Sušící linka

5.1 Požadavky na sušící linku

Při návrhu sušící a peletovací linky je třeba zajistit kontinuální výrobu pilin či jiného biologického materiálu a jeho následné vysušení pomocí vhodných komponentů a jejich složením do technologického celku.

Sušící linka by měla v průběhu technologického zpracování pro správný chod zajistit následující požadavky:

- příprava a drcení zpracovávaného materiálu (je-li to nutné)
- odstranění případných nežádoucích cizích materiálů ze zpracovávaného materiálu
- dávkování a dopravu materiálu ze skladu mezi jednotlivými stanovišti úprav
- zajištění energie pro sušárnu pilin
- sušení pilin na vhodnou vlhkost pro peletování
- odstranění případných emisí vzniklých při sušení
- slisování vysušených pilin do formy pelet
- vychlazení pelet a přípravu k následnému exportu
- možnost řízení výkonu linky

5.2 Základní části sušící linky

5.2.1 Horkovzdušný kotel

Jako zdroj energie jsou používány pro bubnové sušárny horkovzdušné kotle spalující dřevní odpad (štěpku) a zásobují sušárnu spalinami ochlazenými vzduchem. Na obr. 5.1 je příklad kotle konstruovaného pro bubnové sušárny od firmy Fiedler o výkonu 300 kW. Tento kotel je uzpůsoben pro spalování štěpky do rozměrů 30×50×30 mm a vlhkosti do 40 %. Je opatřen směšovací komorou a zásobníkem paliva o velikosti 1 m³. Výrobci sušáren často používají kotle vlastní konstrukce.



Obr. 5.1: Horkovzdušný kotel Fiedler; převzato z [21]

5.2.2 Sušárna

Sušení pilin zajišťuje buben sušárny, pro účely práce byl navržen buben s délkou 6,4 m a průměrem 1,6 m. Je proveden v ocelovém provedení s vestavbou zajišťující kontinuální promíchávání pilin.

5.2.3 Šnekový dopravník

Šnekové dopravníky se používají pro dopravu již vytříděného materiálu do sušárny. Jsou poháněny elektromotorem a jejich výhodou je bezprašný provoz. Na vstupu do sušárny podávají materiál do násypky sušárny. Po vysušení materiálu je šnekový dopravník použit k vynešení do zásobníku materiálu, popřípadě dopravuje suché piliny k peletovacímu lisu.



Obr. 5.2: Šnekový dopravník; převzato z [27]

5.2.4 Odlučovač pevných částic a ventilátor

Odtahový ventilátor v sušárně zajišťuje průchod spalinami celým systémem. Po jejich nasycení vlhkostí z pilin jsou spaliny odvedeny odlučovače pevných částic (cyklonu). Tam jsou zbaveny případných prachových nečistot, stržených během průchodu sušárnou. Takto vyčištěné jsou potom vedeny mimo objekt do přímo do ovzduší. V případě potřeby je možno provést odlučování i vícestupňově. Ventilátor také udržuje mírný podtlak v celém zařízení a tak znemožňuje případný průnik spalin netěsnostmi.

5.2.5 Elektroinstalace a řídicí systém

Každá kvalitní sušárna je vybavena řídicím panelem, jenž pomocí teplotních čidel v sušárně monitoruje její stav a je schopen ovládat její výkon, nebo reagovat na nenadálé změny, např. ve složení paliva nebo vlhkosti sušeného materiálu. Elektroinstalace zajišťuje chod pohonu jak vlastního bubnu sušárny, tak motorů pro šnekové tříděče a odtahového ventilátoru. Elektrický příkon sušáren je velice odvislý od konkrétního umístění, množství příslušenství a stupně automatizace.

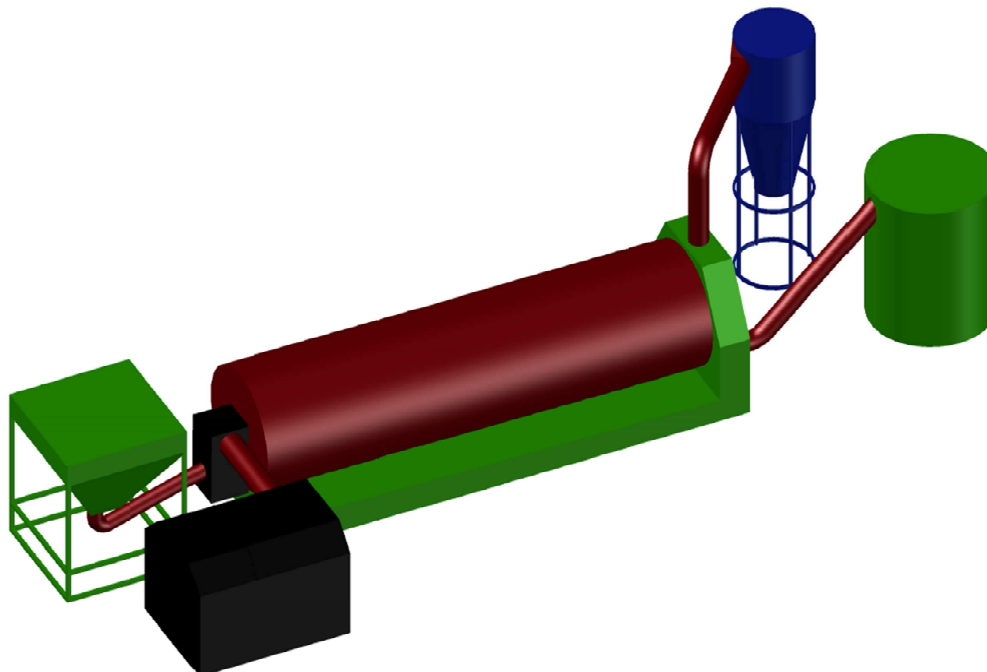
5.2.6 Další příslušenství

Mimo základní komponenty zmíněné výše je linku možné doplnit dalšími komponenty jako:

- **vibrační tříděč** – slouží k separování pilin od hrubější dřevní frakce,
- **přihrnovací šnek** – přemísťuje nevytříděné piliny z výchozího skladu na systém pásových dopravníků, jeho rameno je otáčivé a pomocí čidel sleduje stav materiálu a v případě jeho spotřebování se přemísť na novou pozici,
- **separátor kovů** – odlučuje kovové nečistoty, které by mohli poškodit sušárnu nebo kotel.

5.3 Technologické schéma sušárny

Na obrázku je znázorněna sestava sušící linky. Sestavu tvoří samotná válcová sušárna (červeně), do jejíž levé části proudí šnekovým dopravníkem sušený materiál z násypky (zeleně) a spaliny z kotle (černě). Z druhého konce sušárny je vysušený materiál veden do sila (zeleně) a spaliny to odlučovače pevných částic (modře).



Obr. 5.3: Schéma základní sestavy sušárny

6 Tepelný výpočet bubnové sušárny

6.1 Bilance sušených pilin

Zvolené a zadané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.1:

Tab 6.1: Vstupní hodnoty pro výpočet sušárny

parametr	označení	velikost
zvolená počáteční vlhkost pilin [-]	x_{1A}	0,50
zadaná koncová vlhkost pilin [-]	x_{2A}	0,10
zadaný výkon sušárny [kg/hod]	\dot{m}_c	300

Obsah vody v usušených pilinách:

$$\dot{m}_{2w} = \dot{m}_c \cdot x_{2A} \text{ [kg/hod]}$$

$$\dot{m}_{2w} = 300 \cdot 0,1 = 30 \text{ kg/hod}$$

Obsah sušiny:

$$\dot{m}_{2A} = \dot{m}_c \cdot (1 - x_{2A})$$

$$\dot{m}_{2A} = 300 \cdot (1 - 0,1) = 270 \text{ kg/hod}$$

Množství vlhkých pilin potřebných pro stanovený výkon:

$$\dot{m}_{1A} = \dot{m}_c \cdot \frac{(1 - x_{2A})}{(1 - x_{1A})}$$

$$\dot{m}_{1A} = 300 \cdot \frac{(1 - 0,1)}{(1 - 0,5)} = 540 \text{ kg/hod}$$

Množství vody v sušených pilinách:

$$\dot{m}_{1w} = 540 - 270 = 270$$

Množství vody odebrané z pilin během sušení:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{1A} - \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_w = 540 - 300 = 240 \text{ kg/hod}$$

6.2 Tepelná bilance sušárny:

Vstupní hodnoty:

měrná tepelná kapacita vody : $c_v = 4180 \text{ kJ/kgK}$

měrné výparné teplo vody: $r_{FG} = 2,5 \text{ MJ/kg}$

počáteční teplota sušených pilin: $t_{1A} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

teplota spalin jdoucích ze sušárny: $t_{1B} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

teplota varu vody: $t_{1B} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Množství tepla k ohřevu vody:

$$\dot{Q}_{Ov} = c_v \cdot m_w \cdot \Delta t$$

$$\dot{Q}_{Ov} = 4180 \cdot 240 \cdot (100 - 20) = 80256000 \text{ J/hod} = 80,256 \text{ MJ/hod}$$

Množství tepla k ohřevu vodní páry:

$$\dot{Q}_{Op} = c_{vp} \cdot m_w \cdot \Delta t$$

$$\dot{Q}_{Op} = 1840 \cdot 240 \cdot (200 - 100) = 44160000 \text{ J} = 44,16 \text{ MJ/hod}$$

Množství tepla k odpaření vody:

$$\dot{Q}_{Od} = r_{FG} \cdot m_w$$

$$\dot{Q}_{Od} = 2,5 \cdot 240 = 600 \text{ MJ/hod}$$

Celkové množství potřebného dodaného tepla:

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{Op} + \dot{Q}_{Ov} + \dot{Q}_{Od}$$

$$\dot{Q}_C = 80,256 + 44,16 + 600 = 724,416 \text{ MJ/hod}$$

Tepelný příkon potřebný pro sušení:

$$P = \frac{\dot{Q}_C}{3,6}$$

$$P = \frac{724,416}{3,6} = 201 \text{ kW}$$

6.3 Vlastnosti paliva

Pro sušení pilin v bubnových sušárnách se používá ve většině případů odpadní dřevo, v našem případě budeme předpokládat sušení směsi štěpky a vysušených pilin, s celkovou vlhkostí 30 %. Prvkový rozbor zvoleného paliva získán z literatury [11].

Tab 6.2: Parametry paliva; podle [11]

vlhkost štěpky	W^r	30 %
obsah popela	A^d	0,53 %
obsah uhlíku v hořlavíně	C^{daf}	50,3 %
obsah kyslíku v hořlavíně	O^{daf}	43,4 %
obsah vodíku v hořlavíně	H^{daf}	6,16 %
obsah dusíku v hořlavíně	N^{daf}	0,12 %
obsah síry v hořlavíně	S^{daf}	0,01 %

Složení paliva v surovém stavu:

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) = 0,0053 \cdot (1 - 0,3) = 0,00371$$

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,503 \cdot (1 - 0,3 - 0,00371) = 0,3502$$

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,0616 \cdot (1 - 0,3 - 0,00371) = 0,0429$$

$$N^r = N^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,0012 \cdot (1 - 0,3 - 0,00371) = 0,0008$$

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,434 \cdot (1 - 0,3 - 0,00371) = 0,3022$$

$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,001 \cdot (1 - 0,3 - 0,00371) = 0,00007$$

Výhřevnost paliva

$$Q_i^r = 34,75 \cdot C^r + 95,3 \cdot H^r - 10,9 \cdot (O^r - S^r) - 2,5 \cdot W^r$$

$$\begin{aligned} Q_i^r &= 34,75 \cdot 0,3502 + 95,3 \cdot 0,0429 - 10,9 \cdot (0,3022 - 0,00007) - 2,5 \cdot 0,3 = \\ &= 12,22 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

6.4 Stechiometrie

6.4.1 objemy vzduchu

Minimální spotřeba kyslíku při spálení 1 kg paliva:

Toto teoretické množství kyslíku na spálení určíme součty jednotlivých složek hořlaviny.

$$V_{O_2 min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,32} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right)$$

$$V_{O_2 min} = 22,39 \cdot \left(\frac{35,02}{12,01} + \frac{4,29}{4,32} + \frac{0,07}{32,06} - \frac{30,22}{32} \right) = 0,68 \text{ m}_{O_2}^3 / \text{kg}_{pal}$$

Minimální spotřeba suchého vzduchu při spálení 1 kg paliva:

Minimální podíl suchého vzduchu se spočítá z objemu kyslíku podělené o zastoupení kyslíku v zemské atmosféře.

$$V_{V min}^S = \frac{V_{O_2 min}}{0,2103} = \frac{0,68}{0,2103} = 3,234 \text{ m}_{vzd}^3 / \text{kg}_{pal}$$

Součinitel f

Součinitel f určuje poměrného zvětšení suchého vzduchu s uvažovanou vodní parou. Jeho velikost závisí na stávající teplotě a relativní vlhkosti vzduchu podle rovnice:

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p^a}{p_c - p^a} \quad [-]$$

V praxi se jeho hodnoty pochybují mezi 1,01 a 1,05. Pro výpočet volím $f = 1,024$

Minimální spotřeba vlhkého vzduchu při spálení 1kg paliva:

$$V_{V min}^V = f \cdot V_{V min}^S = 1,024 \cdot 3,23 = 3,312 \text{ m}_{vzd}^3 / \text{kg}_{pal}$$

6.4.2 Minimální objemy spalin

Minimální množství suchých spalin:

CO₂ vzniklý spálením uhlíku v hořlavině, spolu s obsahem ve spáleném vzduchu:

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{21,01} \cdot C^r + 0,003 \cdot V_{V \min}^S$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{21,01} \cdot 0,3502 + 0,003 \cdot 3,234 = 0,650 \text{ m}^3_{CO_2}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

N₂ vzniklý z hořlaviny, spalovacího vzduchu:

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7897 \cdot V_{V \min}^S$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,00 + 0,7897 \cdot 3,234 = 2,555 \text{ m}^3_{N_2}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

Ar ze spalovacího vzduchu:

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{V \min}^S$$

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot 3,234 = 0,0298 \text{ m}^3_{Ar}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

SO₂ vzniklý ze síry v hořlavině:

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0007 = 0,00048 \text{ m}^3_{SO_2}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

Celkové minimální množství suchých spalin:

$$V_{SP \min}^S = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} + V_{SO_2}$$

$$V_{SP \min}^S = 0,650 + 2,555 + 0,0298 + 0,00048 = 3,235 \text{ m}^3_{\text{sp}}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

Minimální množství vodní páry ve spalinách:

Voda ve formě páry vzniká z vodíku v hořlavině a vlhkosti obsažené v palivu a spalovacím vzduchu.

$$V_{H_2O \min} = \frac{44,82}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,41}{18,016} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{V \min}^S$$

$$V_{H_2O \min} = \frac{44,82}{4,032} \cdot 0,0429 + \frac{22,41}{18,016} \cdot 0,3 + (1,024 - 1) \cdot 3,234$$

$$V_{H_2O \min} = 0,927 \text{ m}^3_{H_2O}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

Minimální množství vlhkých spalin:

$$V_{SP \min}^V = V_{SP \min}^S + V_{H_2O \min}$$

$$V_{SP \min}^V = 3,235 + 0,927 = 4,1627 \text{ m}^3_{\text{sp}}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

6.4.3 Skutečné objemy spalin**Součinitel přebytku vzduchu**

Při spalování paliv v praxi nepostačí pouze teoretické množství vzduchu spočítané výše. Při tomto množství by spalování probíhalo neúplně. Proto ve skutečnosti spalování probíhá za přebytku vzduchu.

Celkové skutečné množství vzduchu vyjadřuje součinitel přebytku vzduchu α . Bezrozměrná veličina, jenž udává poměr mezi skutečným množstvím přiváděného vzduchu a teoretickým množstvím vzduchu potřebným pro spalování. V dalších výpočtech je počítáno s $\alpha = 1,3$,

Skutečné množství vzduchu:

$$V_{SK} = V_{V \min}^S \cdot \alpha$$

$$V_{SK} = 3,112 \cdot 1,3 = 4,0456 \text{ m}^3_{SK}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

Skutečné množství vlhkých spalin:

$$V_{SP} = V_{SP \min}^V + (\alpha - 1) \cdot V_{V \min}^V$$

$$V_{SP} = 4,163 + (1,3 - 1) \cdot 3,312 = 5,156 \text{ m}^3_{\text{sp}}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

Skutečné množství vodní páry ve spalinách:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O \min} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{V \min}^S$$

$$V_{H_2O} = 0,927 + (1,3 - 1) \cdot (1,024 - 1) \cdot 3,234 = 0,959 \text{ m}^3_{H_2O}/\text{kg}_{\text{pal}}$$

Objemové podíly jednotlivých plynů ve vlhkých spalinách:

$$\omega_{SP N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SP}} = \frac{2,555}{5,487} = 0,466$$

$$\omega_{SP H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SP}} = \frac{0,9595}{5,487} = 0,175$$

$$\omega_{SP\ vzd} = \frac{[(\alpha - 1) \cdot V_{V\ min}^V]}{V_{SP}} = \frac{[(1,4 - 1) \cdot 3,312]}{5,487} = 0,241$$

$$\omega_{SP\ CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SP}} = \frac{0,650}{5,487} = 0,119$$

$$\omega_{SP\ Ar} = \frac{V_{Ar}}{V_{SP}} = \frac{0,0298}{5,487} = 0,0054$$

$$\omega_{SP\ SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{SP}} = \frac{0,00048}{5,487} = 0,00008$$

Objemové části tříatomových plynů:

$$r_{RO_2} = \omega_{SP\ CO_2} + \omega_{SP\ SO_2}$$

$$r_{RO_2} = 0,119 + 0,00008 = 0,11908$$

$$r_{SV} = r_{RO_2} + \omega_{SP\ H_2O}$$

$$r_{SV} = 0,11908 + 0,175 = 0,293$$

6.4.4 Entalpie vzduchu a spalin

Tab 6.3: Entalpie jednotlivých složek spalin; podle [6]

teplota t [°C]	entalpie složek spalin				
	i_{CO_2} [kJ /m ³]	i_{N_2} [kJ /m ³]	i_{H_2O} [kJ /m ³]	i_{SO_2} [kJ /m ³]	i_{Ar} [kJ /m ³]
100	170	130	150	189	93
200	357	260	304	392	186
300	559	392	463	610	287
400	772	524	626	836	372
500	994	666	795	1070	465
600	1225	804	969	1310	557
700	1462	948	1149	1550	650
800	1705	1094	1334	1800	743
900	1952	1240	1526	2050	834

Entalpie minimálního množství spalin

$$I_{sp\ min} = V_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + i_{SO_2} \cdot V_{SO_2} + V_{N_2} \cdot i_{N_2} + V_{H_2O\ min} \cdot i_{H_2O\ min} + V_{Ar} \cdot i_{Ar}$$

$$I_{sp\ min} = 0,65 \cdot 357 + 0,000475 \cdot 392 + 2,555 \cdot 260 + 0,927 \cdot 304 + 0,0298 \cdot 186 = 1184,037\ \text{kJ/kg}$$

Měrné teplo vlhkého vzduchu:

$$d_f = (f - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = (1,013 - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 14,923\ \text{g/kg}$$

$$c_{vzd} = c_s + 0,0016 \cdot d = 1,301 + 0,0016 \cdot 14,923 = 1,325\ \text{kJ/m}^3\text{K}$$

Entalpie minimálního množství vzduchu:

$$I_{vz\ min} = V_V^S \cdot c \cdot t$$

$$I_{vz\ min} = 3,234 \cdot 1,325 \cdot 30 = 128,549\ \text{kJ/kg}$$

Entalpie skutečného množství spalin při přebytku vzduchu:

$$I_{SP} = I_{sp\ min} + (\alpha - 1) \cdot I_{vz\ min}$$

$$I_{SP} = 1184,037 + (1,3 - 1) \cdot 128,549 = 1222,805\ \text{kJ/kg}$$

Entalpie skutečného množství vzduchu:

$$I_{vz} = I_{vz\ min} \cdot \alpha$$

$$I_{vz} = 128,549 \cdot 1,3 = 179,969\ \text{kJ/kg}$$

6.5 Ztráty a účinnost kotle

6.5.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích:

Hodnota výhřevného nedopalů: $Q_{ci} = 32600\ \text{kJ/kg}$, hodnoty hořlaviny v uvažovaných druzích tuhých zbytků c_i a procenta popela X_i jsou uvedeny v tabulce 6.4.

Tab 6.4: Přehled hodnot pro výpočet ztrát; podle [6]

obsah hořlaviny v tuhých zbytcích [%]		obsah popela zachyceného v tuhých zbytcích [%]	
c_s	10	X_s	75
$c_{\dot{u}}$	3	$X_{\dot{u}}$	15
c_r	20	X_r	5

Ztráta v úletu:

$$z_{\dot{u}} = \frac{c_{\dot{u}}}{100 - c_{\dot{u}}} \cdot \frac{X_{\dot{u}}}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_i^r} \cdot Q_{ci} \cdot 100$$

$$z_{\dot{u}} = \frac{3}{100 - 3} \cdot \frac{15}{100} \cdot \frac{0,371}{12221,9} \cdot 32600 \cdot 100 = 0,459 \%$$

Ztráta v tuhých zbytcích zachycených v ohništi:

$$z_s = \frac{c_s}{100 - c_s} \cdot \frac{X_s}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_i^r} \cdot Q_{ci} \cdot 100$$

$$z_s = \frac{10}{100 - 10} \cdot \frac{75}{100} \cdot \frac{0,371}{12221,9} \cdot 32600 \cdot 100 = 8,25 \%$$

Ztráta roštovým propadem:

$$z_r = \frac{c_r}{100 - c_r} \cdot \frac{X_r}{100} \cdot \frac{A_r}{Q_i^r} \cdot Q_{ci} \cdot 100$$

$$z_r = \frac{20}{100 - 20} \cdot \frac{5}{100} \cdot \frac{0,371}{12221,9} \cdot 32600 \cdot 100 = 1,24 \%$$

Celková ztráta v tuhých zbytcích:

$$z_c = z_{\dot{u}} + z_s + z_r = 0,459 + 8,25 + 1,24 = 9,94 \%$$

6.5.2 Komínová ztráta

$$z_k = (100 - z_c) \cdot \frac{I_{sp} - I_{vz}}{Q_i} \cdot 100$$

$$z_k = (100 - 9,94) \cdot \frac{1222,805 - 179,97}{Q_i} \cdot 100 = 7,68 \%$$

6.5.3 Celková účinnost kotle

$$\eta_K = 100 - (z_k + z_c)$$

$$\eta_K = 100 - (7,68 + 9,94) = 82,37 \%$$

6.6 Množství paliva pro sušení

$$\dot{m}_{pal} = \frac{P}{\frac{\eta_K}{100} \cdot Q_i^r}$$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{201}{\frac{82,37}{100} \cdot 12221,9} = 0,019988 \frac{kg}{s} \doteq 72 \text{ kg/hod}$$

6.7 Množství a vlhkost spalin procházející sušárnou

Množství spalin vstupujících do sušárny:

$$\dot{V}_{SP} = V_{SP} \cdot \dot{m}_{pal}$$

$$\dot{V}_{SP} = 5,156 \cdot 71,96 = 371,02 \text{ m}_3/\text{hod}$$

Vlhkost spalin jdoucích do sušárny:

$$x_{1B} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SP}}$$

$$x_{1B} = \frac{0,950}{5,156} = 0,1843$$

Vlhkost spalin po výstupu ze sušárny:

$$x_{2B} = \frac{\tau \cdot \dot{V}_{SP} \cdot \frac{x_{1B}}{1 - x_{1B}} + m_w}{\tau \cdot \dot{V}_{SP}}$$

$$1 + \frac{\tau \cdot \dot{V}_{SP} \cdot \frac{x_{1B}}{1 - x_{1B}} + m_w}{\tau \cdot \dot{V}_{SP}}$$

$$x_{2B} = \frac{\frac{1 \cdot 371,02 \cdot \frac{0,1843}{1 - 0,1843} + 240}{1 \cdot 371,02}}{1 + \frac{1 \cdot 371,02 \cdot \frac{0,1843}{1 - 0,1843} + 240}{1 \cdot 371,02}} = 0,466$$

6.8 Výpočet rozměrů bubnu sušárny

Objem bubnu stanovíme podle vzorce [8]:

$$V = \frac{\dot{m}_c \tau}{\rho_s \cdot \psi} = \frac{300 \cdot 1}{240 \cdot 0,1} = 12,5 \text{ m}^3$$

Průměr bubnu sušárny je dán vztahem:

$$d = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot V \cdot l}{\pi}}$$

Délka bubnu se pohybuje v rozmezí $l/d = 4-6$, pro náš případ volím $l/d=4$, průměr bubnu je potom:

$$d = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} = \frac{12,5}{\pi} \doteq 1,6 \text{ m}$$

Délka bubnu:

$$l = 4 \cdot d = 4 \cdot 1,6 = 6,4 \text{ m}$$

7 Ekonomická rozvaha

7.1 Technické posouzení samotné sušárny

Bubnová sušárna zadaného výkonu potřebuje ke svému provozu tepelný výkon o hodnotě 200 kW. Během hodiny provozu vysuší 540 kg dřevních pilin o uvažované počáteční vlhkosti 50 % na požadované množství 300 kg pilin o výstupní vlhkosti 10 %: Během procesu odpaří 240 kg vody. Při tom spotřebuje při započtení ztrát kotle 72 kg paliva, kterým je odpadní štěpka s pilinami o vlhkosti 30 %. Vlastní energetická spotřeba sušárny se příslušenstvím se pohybuje okolo 30 kW. Buben sušárny má navrhnoutou délku 6,4 m, průměr bubnu je 1,4 m. technické parametry shrnuje tab. 7.1.

Tab 7.1: Technické parametry navrhnuté sušárny

Spotřeba vlhkých pilin (50 %)	540 kg/hod
Množství vyrobených suchých pilin (10 %)	300 kg/hod
Tepelný příkon potřebný k vysušení	201 kW
Množství odpařené vody během sušení	240 kg/hod
Množství spotř. paliva (štěpka a piliny w = 30 %)	74 kg/hod
Rozměry sušárny (průměr bubnu / délka bubnu)	1,4 m / 6,4 m
Vlastní energetická spotřeba (s příslušenstvím)	30 kW

7.2 Ekonomika provozu při zapojení do peletizační linky

7.2.1 Pořizovací náklady na linku a roční výdaje

Bubnová sušárna během provozu vysušuje piliny na vlhkost, která je vhodná pro následné peletování. Tato kapitola se pokusí rámcově určit náklady na peletovací linku zadaného výkonu s kompletním příslušenstvím. Dále učít náklady na její provoz a zisk tvořený prodejem vyrobených pelet.

Pořizovací cena linky Briklis BUS 400 a peletovacího lisu Novapellet je v tabulce 7.2. Linka BUS 400 je výkonově porovnatelná se sušárnou navrhnoutou v této práci (parametry BUS 400 viz tab. 4.4). Jako peletovací lis vybrán výrobek italské Firmy Novapellet. Ceny jsou získány od českých distributorů Spintech (pro sušárnu BUS 400) a Epimex (lis Novapellet).

Tab 7.2: Pořizovací náklady na peletovací linku

Linka BUS 400	
Přihrnovací šnek	426 000 Kč
Vibrační třídič	210 000 Kč
Dopravníky	463 000 Kč
Bubnová sušárna pilin BUS	1 377 000 Kč
Kotel	555 000 Kč
Ventilátor s cyklonem	375 000 Kč
Elektrický rozvaděč	160 000 Kč
Briketovací lis Novapellet	
soustava lisu s baličkou	2 500 000 Kč
Technologický projekt	36 000 Kč
Montáž	220 000 Kč
Celková pořizovací cena	6 322 000 Kč

Počet pracovních hodin sušárny při třísměnném nepřetržitém ročním provozu s jednou směnou na týdně v délce osmi hodin na odstávku a údržbu linky. :

$$n_{suš} = (d_{rok} \cdot 24) - (t_{rok} \cdot 8) = 360 \cdot 24 - 51 \cdot 8 = 8232$$

Tabulka 7.1 podává přehled výdajů pro podnik, který peletuje z odpadu vzniklého vlastní produkci. Není v něm tedy zahrnuta cena pilin a štěpky na topení. Jako obsluha linky je počítáno se třemi zaměstnanci na směnu. Příkon celé linky je určen na základě technických parametrů na 60 kW (30 kW sušička, 30 kW lis). Hodinová mzda zvolena a cena energie za kWh podle www.cenyenergie.cz.

Tab 7.3: Přehled výdajů na provoz linky

	jednotkový hodinový výdaj	celkový hodinový výdaj	celkový roční výdaj
mzdové náklady	90 Kč	270 Kč	2 222 640 Kč
elektrická energie	4,89 Kč	146,7 Kč	2 415 268 Kč
Celkem	94,89 Kč	346,7 Kč	4 637 908 Kč

7.2.2 Příjmy za prodej pelet

Část pilin se spotřebuje na smíchání s odpadní vlhkou štěpkou použitou spolu s pilinami jako směs pro sušení. Při 10% vlhkosti pilin a 50% vlhkosti paliva je třeba přidávat piliny a štěpku ve stejném poměru. Na 74 kg paliva a 300 kg vyrobených pilin je tedy 37 kg suchých pilin spotřebováno. Roční výroba pelet je potom:

$$m_{pel} = n_{suš} \cdot (\dot{m}_c - 37) = 8232 - (300 \cdot 37) = 2165 \text{ t}$$

Cena za tunu peletek se v průběhu roku kolísá, průměrná cena na základě průměru údajů z [22] určena na 5900 Kč za tunu. Roční příjmy pak po pronásobení počtem vyrobených tun představují částku 12 773 594 Kč.

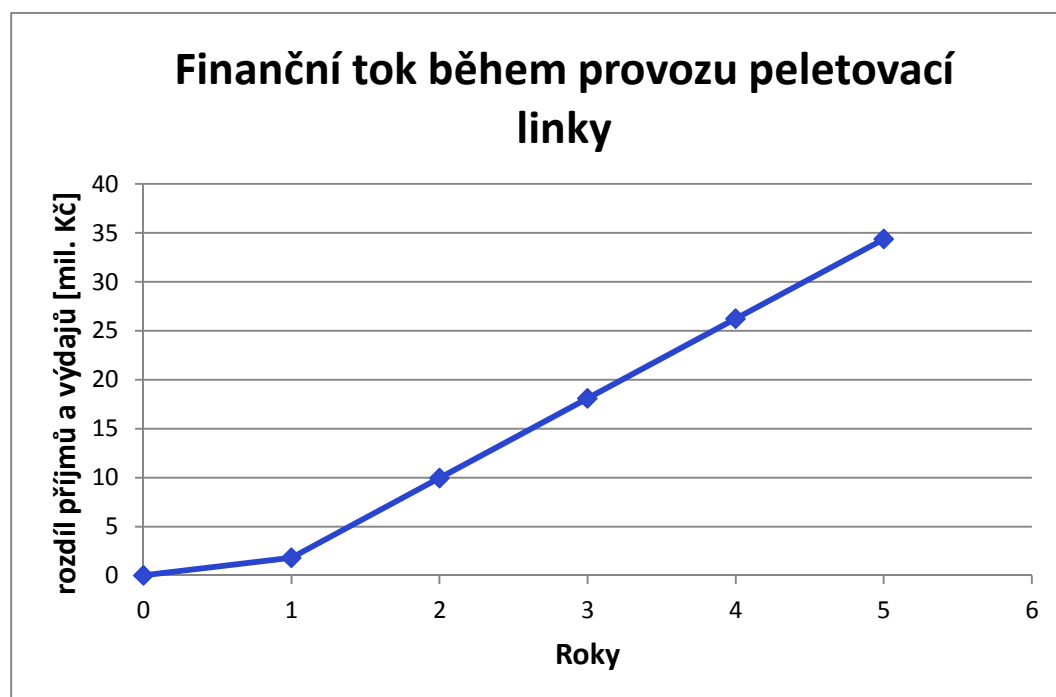
7.2.3 Celkový finanční tok

Celkový finanční tok je znázorněn na obrázku 7.1 na základě tabulky 7.4.

Tab 7.4: Peněžní toky v průběhu let

Rok	Příjmy [mil. Kč]	Výdaje[mil. Kč]	Rozdíl [mil. Kč]
0	0	0	0
1	12,77	10,95	1,81
2	25,54	15,59	9,94
3	38,32	20,23	18,08
4	51,09	24,87	26,22
5	63,86	29,51	34,35

”



Obr. 8.1: Graf finančního toku peletovací linky

8 závěr

V první části si práce kladla za úkol předložit důvody pro snižování vlhkosti biomasy. V kapitole 2 je jako úvod do problematiky podán stručný přehled o rozdělení biomasy spolu s její definicí. Rozdělení je provedeno podle několika hledisek, ať už jde o obsah vody, nebo původ biomasy.

Dále je biomasa charakterizována z hlediska použití jako palivo. Jsou vyjmenovány jednotlivé parametry charakterizující její kvalitu, jako je výhřevnost, vlhkost atd. Na základě těchto zpracovaných informací je věnována pozornost vlhkosti biomasy. Snížení vlhkosti se projevuje nejzásadněji ve zlepšení výhřevnosti, dosažení lepších vlastností při hoření, zmenšení komínové ztráty kotle a snížení obsahu spalin. Dosáhneme také snížení nebezpečí degradace působením mikroorganismů. Vysušení biomasa snižuje náklady na její přepravu a umožňuje úpravu na pelety. Energetickému hledisku výroby pelet se věnuje kapitola 3.3.1.

Přehled sušáren je uveden v kapitole 4. Úvodní část se zabývá teorií ohledně technologie sušení a rozdělením sušáren. Dále jsou v krátkosti představeny nejpoužívanější technologie sušáren. Detailněji tato kapitola představuje sušení v bubnové sušárně a její srovnání s dalšími dvěma nejpoužívanějšími typy. Na základě těchto poznatků jsou v další kapitole vyjmenovány požadavky na sušící linku společně se základními komponenty a příslušenstvím a navrhuto technologické schéma se základními částmi sušící linky.

Poslední část práce počítá hlavní rozměry bubnové sušárny pilin o výkonu 300 kg/hod spolu s určením množství paliva pro sušení. Navržené rozměry bubnu sušárny jsou spolu s ostatními základními parametry uvedeny v tabulce 7.1.

Tyto údaje slouží společně se zjištěnou cenou peletovací linky pro ekonomické zhodnocení. Orientační pořizovací náklady na peletovací linku se sušárnou byly poptány u dodavatelů jednotlivých systémů a jsou předloženy v tabulce 7.3. Zároveň jsou odhadnuty základní náklady spojené s provozem linky. Investice do kompletní peletovací linky je odhadnuta na 6,3 mil. Kč včetně montáže a vypracování projektu. Roční náklady na provoz činí 4,6 mil. Kč. Spočítané zisky prodejem pelet při nepřetržitém provozu sušárny jsou stanoveny na 12,7 mil Kč při uvažované prodejní ceně pelet 5900 Kč za tunu. Objem vyrobených pelet činí 2165 tun. Studie počítá s provozem, který

materiál pro peletování získává jako odpad při vlastní činnosti. Finanční tok v průběhu pěti let je znázorněn na obrázku 7.1.

Odhad nákladů na provoz a pořízení linky je třeba brát orientačně, neboť nebyl zpracováván pro případ konkrétního podniku a ceny a energetická spotřeba linky se může velice měnit v závislosti na konkrétním projektu. Udává však rámcový příklad zapojení technologie sušení a peletování na využití dřevěného odpadu v dřevozpracujícím závodě.

9 Seznam použité literatury

1. MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2011, 106 s. Stavíme. ISBN 978-80-251-2916-6.
2. OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy: studie v rámci projektu Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006, 185 s. ISBN 80-248-1207-X.
3. ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. 1. Vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983, 858 s., 2 příl.
4. ZÁRYBNICKÁ, M. *Návrh sušky na biomasu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.
5. MÍKA, Vladimír. *Základy chemického inženýrství*. Praha, 1981.
6. BUDAJ, Florian. *Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet*. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992, 200 s.
7. STRAKA, L. *Sušení biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství., 2011. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
8. ZVONÍČEK, Jan. *Sušárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1966.
9. ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*. Vyd. 2. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006c1997, 165 s. ISBN 80-01-03475-5.
10. HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER a Dalimil ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. 2. přeprac. vyd. Praha: VŠCHT, 2007, 350 s. ISBN 978-80-7080-002-7.
11. SKÁLA, Zdeněk. *Energetické parametry biomasy: projekt : GAČR 101/04/1278*. 1.vyd. Brno: VUT Fakulta strojního inženýrství, 2007, 91 s. ISBN 978-80-214-3493-6.

10 Seznam internetových zdrojů

12. DVOŘÁČEK, Tomáš: *Využití univerzální šnekové sesypné sušárny BCS – 1*. Biom.cz [online]. 2014-04-07 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-univerzalni-snekove-sesypne-susarny-bcs-1> . ISSN: 1801-2655.
13. BRABEC J.: *Tarpo.cz* [online]. 2011 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.tarpo.cz/Tarpo/Produkty/Fluidni_susarny.html
14. Sušičky dřevní štěpky. *Cyberma s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2014-05-2]. Dostupné z : <http://www.cyberma.cz/susicky-drevni-stepky>
15. Úpravárenská technika - AL-MO. WEIß, Hermann, Mathias TROJOVSKÝ a Markus KLEIN. *Sušení organických zbytků v sušárně s válcovým ložem* [online]. 2012 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://al-mo.cz/content/file/Allgaier_susarna_s_valcovym_lozem_WB_T.pdf
16. STUPAVSKÝ, Vladimír: *Pelety z biomasy - dřevěné, rostlinné, kůrové pelety*. Biom.cz [online]. 2010-01-01 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/pelety-z-biomasy-drevene-rostlinne-kurove-pelety>. ISSN: 1801-2655.
17. LYČKA, Zdeněk: *Energetická náročnost výroby pelet z biomasy*. Biom.cz [online]. 2011-02-02 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z : <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticka-narocnost-vyroby-pelet-z-biomasy>. ISSN: 1801-2655.
18. LYČKA, Zdeněk: *Význam peletizace dřevní hmoty*. Biom.cz [online]. 2011-04-18 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyznam-peletizace-drevni-hmoty>. ISSN: 1801-2655.
19. BERANOVSKÝ, J., et al.: *Energie biomasy*. EkoWATT.cz [online]. c2007 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energiebiomasy>.
20. Avantis partners. *Katalog - sušička pilin* [online]. 2013 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.avantispartners.cz/cs/katalogovy-list-susicka>
21. Fiedler: *Automatické kotle na spalování biomasy. Automatický kotel SZDO BS 300kW* [online]. 2014 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: <http://www.kotlenabiomasu.com/?49,automaticky-kotel-szdo-bs-300kw>
22. *Přehled cen pelet*. Tzb-info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energie/prehled-cen-pelet>

23. Klasifikace biomasy. JUCHELKOVÁ, Dagmar. Vysoká škola Báňská [online]. 2009 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Index.html
24. Bubnová sušárna pilin BUS. Briklis, spol. s r. o. [online]. 2014 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://www.briklis.cz/susarny-linky/susarny-pilin/#product-tabs=technicke_udaje
25. Fotosyntéza. Střední zdravotnická škola, Karviná [online]. [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.sszdra-karvina.cz/bunka/bi/05met/metf4.htm>
26. BECHNÍK, Bronislav. Vliv sorpce vlhkosti v konstrukcích na energetickou bilanci stavby Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/1535-vliv-sorpce-vlhkosti-v-konstrukcich-na-energetickou-bilanci-stavby>. In: *Tzb-info: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. 2003 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1535-vliv-sorpce-vlhkosti-v-konstrukcich-na-energetickou-bilanci-stavby>
27. Šnekový dopravník s plynulou regulací. Green Energy [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.briketovacilis.eu/produkty/snekovy-dopravnik-s-plynulou-regulaci>

11 Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Jednotka	Název
x_{1A}	$[-]$	počáteční vlhkost pilin
x_{2A}	$[-]$	koncová vlhkost pilin
\dot{m}_c	$[\text{kg}/\text{hod}]$	množství suchých pilin
\dot{m}_{2w}	$[\text{kg}/\text{hod}]$	obsah vody v sušených pilinách
\dot{m}_{2A}	$[\text{kg}/\text{hod}]$	množství sušiny v pilinách
\dot{m}_{1A}	$[\text{kg}/\text{hod}]$	množství vlhkých pilin
\dot{m}_{1w}	$[\text{kg}/\text{hod}]$	množství vody v sušených pilinách
\dot{m}_w	$[\text{m}]$	množství odpařené vody
c_v	$[\text{kJ}/\text{kgK}]$	měrná tepelná kapacita vody
r_{FG}	$[\text{MJ}/\text{kg}]$	výparné teplo vody
t_{1A}	$[\text{°C}]$	počáteční teplota pilin
t_{1B}	$[\text{°C}]$	teplota spalin na výstupu ze sušárny
t_{vW}	$[\text{°C}]$	teplota varu vody
\dot{Q}_{0v}	$[\text{MJ}/\text{hod}]$	množství tepla k ohřevu vody
\dot{Q}_{0p}	$[\text{MJ}/\text{hod}]$	množství tepla k ohřevu páry
c_{vp}	$[\text{kJ}/\text{kgK}]$	měrná tep. kapacita páry
\dot{Q}_{0D}	$[\text{MJ}/\text{hod}]$	množství tepla na odpaření vody
\dot{Q}_C	$[\text{MJ}/\text{hod}]$	celkové množství dodávaného tepla
P	$[\text{kW}]$	tepelný příkon
W^r	$[\%]$	vlhkost štěpky
A^d	$[\%]$	obsah popela
C^{daf}	$[\%]$	obsah uhlíku v hořlavině
O^{daf}	$[\%]$	obsah kyslíku v hořlavině
H^{daf}	$[\%]$	obsah vodíku v hořlavině
N^{daf}	$[\%]$	obsah dusíku v hořlavině
A^r	$[\%]$	rychlost proudění
C^r	$[\%]$	obsah uhlíku v surovém stavu
O^r	$[\%]$	obsah kyslíku v surovém stavu
H^r	$[\%]$	obsah vodíku v surovém stavu
N^r	$[\%]$	obsah dusíku v surovém stavu
A^r	$[\%]$	obsah popela v surovém stavu
V_{O_2min}	$[\text{m}^3/\text{kg}_{pal}]$	minimální spotřeba kyslíku

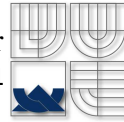
Značka	Jednotka	Název
$V_{V \min}^S$	$[m_{O_2}^3/kg_{pal}]$	minimální suchého vzduchu
V_i	$[m_i^3/kg_{pal}]$	objemy i-té sloučeniny spalin
$V_{SP \min}^S$	$[m_{sp}^3/kg_{pal}]$	minimální objem suchých spalin
$V_{H_2O \min}$	$[m_{sp}^3/kg_{pal}]$	minimální objem vody ve spalinách
$V_{SP \min}^V$	$[m_{sp}^3/kg_{pal}]$	minimální objem vlhkých spalin
V_{SK}	$[m_{SK}^3/kg_{pal}]$	skutečný objem vzduchu
V_{SP}	$[m_{sp}^3/kg_{pal}]$	skutečný objem vlhkých spalin
V_{H_2O}	$m_{H_2O}^3/kg_{pal}$	skutečný objem vodní páry ve spalinách
$\omega_{SP i}$	$[\%]$	objemový podíl i-tého plynu ve spalinách
$V_{V \min}^V$	$[m_{vzd}^3/kg_{pal}]$	minimální spotřeba vlhkého vzduchu
f	$[-]$	součinitel poměrného zvětšení such. vzd.
r_{RO_2}	$[-]$	objemový podíl tříatomových plynů
I_i	$[kJ/kg]$	entalpie i-tého plynu
$I_{sp \min}$	$[kJ/kg]$	entalpie minimálního množství spalin
d_f	$[g/kg]$	obsah vody ve vzduchu
c_{vzd}	$[kJ/m^3K]$	měrné teplo vlhkého vzduchu
$I_{vz \min}$	$[kJ/kg]$	entalpie minimálního množství vzduchu
I_{SP}	$[kJ/kg]$	entalpie skutečného množství spalin
α	$[-]$	součinitel přebytku vzduchu
I_{vz}	$[kJ/kg]$	entalpie skutečného množství vzduchu
z_i	$[\%]$	i-tá ztráta kotle
η_K	$[\%]$	účinnost kotle
\dot{m}_{pal}	$[kg/hod]$	hmotnostní množství spotřeby paliva
\dot{V}_{SP}	$[m_3/hod]$	objemový průtok spalin
x_{1B}	$[-]$	vlhkost spalin na vstupu do sušárny
x_{2B}	$[-]$	vlhkost spalin na výstupu ze sušárny
ψ	$[-]$	koeficient zaplnění sušárny
ρ_s	kg/m_3	sypná měrná hmotnost
l	$[m]$	délka sušárny
d	$[m]$	průměr bubnu
τ	$[hod]$	odhadovaný čas šusení materiálu
$n_{suš}$	$[hod]$	počet provozních hodin v roce
d_{rok}		počet pracovních dní

12 Seznam obrázků

Obr. 2.1: Schéma průběhu fotosyntézy	14
Obr 3.1: Postup při stanovování sypné hmotnosti.....	22
Obr 3.2: Vliv vlhkosti na ostatní vlastnosti biomasy	23
Obr 3.3: Závislost výhřevnosti paliva na vlhkosti.....	24
Obr 3.4: Peletizace dřevní hmoty	25
Obr 4.1: Grafy rovnovážné vlhkosti dřeva pro různé teploty	27
Obr 4.2: Schéma šnekové sesypné sušárny	29
Obr 4.3: Fuidní sušárna	30
Obr 4.4: Pneumatická sušárna	30
Obr. 4.5: Schéma pásové sušárny.....	31
Obr. 4.6: Schéma bubnové sušárny spolu s ukázkami vestaveb	32
Obr. 4.7: Principiální znázornění sušárny s válcovým ložem	33
Obr. 4.8: Rourová sušárna firmy Avantis partners.....	34
Obr. 5.1: Horkovzdušný kotel Fiedler.....	37
Obr. 5.2: Šnekový dopravník	37
Obr. 5.3: Schéma základní sestavy sušárny	39
Obr. 8.1: Graf finančního toku peletovací linky	53

13 Seznam tabulek

Tab 3.1: Výhřevnost u různých plodin.....	18
Tab. 3.2: Hodnoty vlhkosti biomasy pro typické zástupce	18
Tab 3.3: Poměr mezi dřevařskou a energetickou vlhkostí	19
Tab 3.4: Porovnání elementárního rozboru paliva.....	20
Tab 3.5: Chemické složení popela	21
Tab 3.6: Přepočty mezi prostorovými jednotkami.....	23
Tab 3.7: Energetická bilance peletování	25
Tab 4.4: Technické parametry sušáren BUS.....	32
Tab 4.5: Srovnání nejpoužívanějších sušáren	35
Tab 6.1: Vstupní hodnoty.....	40
Tab 6.2: Parametry paliva	42
Tab 6.3: Entalpie jednotlivých složek spalin	46
Tab 6.4: Přehled hodnot pro výpočet ztrát	47
Tab 7.1: Technické parametry navržené sušárny	51
Tab 7.2: Pořizovací náklady na peletovací linku	52
Tab 7.3: Přehled výdajů na provoz linky	52
Tab 7.4: Peněžní tok v průběhu let.....	53



14 Seznam příloh

CD s elektronickou verzí práce