

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2019

**JAKUB
MERTL**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mertl** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **437090**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Integrace sušení biomasy do výtopenského systému

Název diplomové práce anglicky:

Integration of biomass drying into the district heating system

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a bilančně zhodnoťte energeticky efektivní způsob pro sušení mokré biomasy v systému horkovodní výtopy. Práce bude obsahovat:

- 1) Rešerši vhodných způsobů sušení biomasy.
- 2) Návrh integrace energeticky efektivního způsobu sušení biomasy do výtopenského systému.
- 3) Energetickou bilanci navrženého řešení.
- 4) Projekční návrh hlavních komponent systému.
- 5) Ekonomické posouzení návrhu.

Seznam doporučené literatury:

Mujumdar, A.S.: Handbook of industrial drying, CRC Press, 2015

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

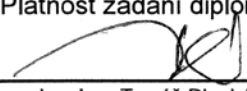
doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc., ústav energetiky FS

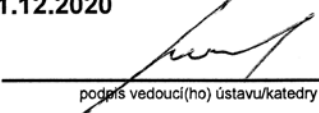
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

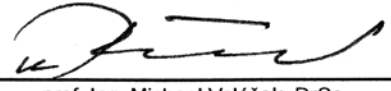
Datum zadání diplomové práce: **17.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**


doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

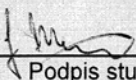

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principu při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 5. 6. 2019

.....

Bc. Jakub Mertl

Anotační list

- Jméno autora:** Bc. Jakub Mertl
- Název DP:** Integrace sušení biomasy do výtopenského systému
- Anglický název:** Integration of biomass drying into the district heating system
- Akademický rok:** 2018/2019
- Ústav/Odbor:** Ústav energetiky
- Vedoucí DP:** doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
- Bibliografické údaje:** Počet stran: 75
Počet obrázků: 24
Počet tabulek: 23
Počet příloh: 0
- Klíčová slova:** Biomasa, sušení, suška, sušárna, výměník, kondenzátor, kotel, energetický systém, otopná soustava, vytápění
- Keywords:** Biomass, drying, dryer, heat exchanger, condenser, boiler, energetic system, heating system, district heating
- Anotace:** Práce se zabývá integrací sušení biomasy do systému horkovodního vytápění a porovnává její přínos oproti systému bez sušení. Do systému je zařazena rotační bubnová sušárna otápaná vodou z kotle, pára ze sušárny je navíc využívána k předehřevu vratné vody z otopné soustavy. Práce rovněž obsahuje návrh použité sušárny a kondenzátoru brýdové páry. Přínos integrace sušení je v závěru shrnut z ekonomického hlediska.
- Abstract:** This thesis describes integration of biomass drying into the district heating system and compares it to a system without it. The system is equipped with a rotary drum dryer, which is heated by the water from a boiler; moreover, the waste vapour is then used for preheating the return pipe water. The thesis also includes design of used dryer and condenser. The benefit of integration of biomass drying is in the end concluded from an economic point of view.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu této diplomové práce panu doc. Ing. Tomáši Dlouhému, CSc. za odborný dohled a cenné rady. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za možnost konzultace a odborné vedení při experimentálním měření. Rovněž děkuji za konzultaci i panu Ing. Zdeňku Fundovi, Ph.D..

Poslední nicméně neméně důležité poděkování patří mým přátelům z Třebíčské univerzitní rady, která mi skrze svá pravidelná zasedání pomohla zachovat si zdravý rozum a připomněla mi, že vysokoškolský život nemusí být jen o náročném studiu.

Obsah

1	Úvod	1
2	Biomasa	2
2.1	Definice	2
2.2	Rozdělení.....	2
2.3	Biomasa jako palivo	2
2.3.1	Složení biomasy	3
2.3.2	Energetické parametry.....	3
3	Sušení biomasy.....	5
3.1	Metody sušení.....	5
3.1.1	Pasivní sušení	5
3.1.2	Aktivní sušení.....	5
3.2	Mechanismy sušení	5
3.2.1	Tepelné	5
3.2.2	Mechanické	6
3.2.3	Fyzikálně-chemické	6
3.2.4	Vymrazování	6
3.3	Typy sušek.....	6
3.3.1	Rotační bubnová.....	7
3.3.2	Fluidní	7
3.3.3	Pásová.....	8
3.3.4	Pneumatická (proudová)	8
3.3.5	Komorová.....	9
4	Návrh energetického systému pro spalování biomasy	10
4.1	Zadání.....	10
4.1.1	Složení paliva	10
4.2	Přepočet složení paliva.....	10
4.3	Stechiometrie.....	12
4.3.1	Minimální objem kyslíku	12
4.3.2	Minimální objem suchého vzduchu	12
4.3.3	Minimální objem vlhkého vzduchu.....	13
4.3.4	Objem vodní páry ve vzduchu	13
4.3.5	Minimální objem suchých spalin	13
4.3.6	Minimální objem vlhkých spalin.....	14
4.3.7	Objem suchých spalin při přebytku vzduchu α	14
4.4	Účinnost kotle.....	15

4.4.1	Zadání.....	15
4.4.2	Ztráta mechanickým nedopalem	16
4.4.3	Ztráta chemickým nedopalem	16
4.4.4	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků.....	17
4.4.5	Ztráta sdílením tepla do okolí.....	17
4.4.6	Ztráta citelným teplem spalin (komínová)	18
4.4.7	Výpočet účinnosti.....	20
4.5	Systém bez sušení biomasy	22
4.5.1	Spotřeba paliva	22
4.5.2	Celková účinnost systému.....	23
4.6	Systém se sušením biomasy	24
4.6.1	Spotřeba paliva	24
4.6.2	Sušení	25
4.6.3	Ohřívák vratné vody.....	26
4.6.4	Výsledné hodnoty po iteraci.....	29
4.6.5	Celková účinnost systému.....	29
5	Experimentální měření na sušárně biomasy	31
5.1	Popis měření	31
5.2	Postup měření	32
5.2.1	Určení vstupní vlhkosti	32
5.2.2	Sušení materiálu v bubnové sušárně	33
5.3	Vyhodnocení měření	35
5.3.1	Měrná spotřeba energie	35
5.3.2	Měrná plošná odpařivost	36
5.3.3	Měrná objemová odpařivost.....	37
5.3.4	Sušicí křivky.....	38
5.3.5	Shrnutí	39
6	Návrh sušárny biomasy	40
6.1	Volba dat pro návrh sušárny.....	40
6.2	Předběžný výpočet hlavních rozměrů sušárny	40
6.2.1	Výpočet otápené plochy	40
6.2.2	Výpočet otápeného objemu.....	40
6.2.3	Výpočet průměru a délky	40
6.3	Návrh skutečných rozměrů bubnu sušárny	41
6.4	Konstrukční provedení sušárny	44
7	Návrh kondenzátoru brýdových par	46

7.1	Vstupní data.....	46
7.2	Koncepce kondenzátoru	46
7.3	Tepelné výpočty	47
7.4	Hydrodynamické výpočty	47
7.4.1	Počet trubek.....	47
7.4.2	Návrh trubkového svazku.....	48
7.5	Součinitel přestupu tepla na vodní straně.....	49
7.5.1	Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu	49
7.5.2	Použité vztahy	50
7.5.3	Návrh přepážek	50
7.5.4	Výpočet hodnot pro kritériální rovnici.....	51
7.6	Celkový součinitel prostupu tepla	52
7.7	Teplosměnná plocha kondenzátoru a délka trubek	53
7.8	Výpočet vstupních a výstupních hrdel	53
7.9	Konstrukční provedení kondenzátoru	54
8	Ekonomická analýza.....	55
8.1	Stanovení investičních nákladů	55
8.1.1	Odhad ceny sušárny biomasy	55
8.1.2	Odhad ceny kondenzátoru brýdové páry.....	56
8.2	Stanovení provozních nákladů	57
8.2.1	System bez sušení.....	57
8.2.2	System se sušením.....	57
8.2.3	Úspora nákladů na palivo.....	58
8.3	Doba návratnosti.....	58
8.4	Shrnutí	59
8.5	Citlivostní analýza.....	59
8.5.1	Investiční náklady	60
8.5.2	Cena vlhké biomasy	61
9	Závěr.....	62
10	Bibliografie.....	63
11	Seznam obrázků	64
12	Seznam tabulek.....	65
13	Seznam grafů.....	66

Seznam použitých symbolů, indexů a zkratek

Veličiny

A	popelovina	w	rychlost
A	teplosměnná plocha	X	podíl popele
I	entalpie	Z	ztráta
c	měrná tepelná kapacita	α	součinitel přestupu tepla
h	měrná entalpie	α	přebytek spalovacího vzduchu
C	obsah uhlíku	η	účinnost
D	vnější průměr	κ	součinitel vlivu vlhkosti vzduchu
d	vnitřní průměr	λ	součinitel tepelné vodivosti
e	měrná spotřeba energie	μ	měrná odpařivost
E	spotřeba energie	ν	kinematická viskozita
h	hořlavina	ρ	hustota
k	součinitel prostupu tepla	τ	čas
l	délka	φ	relativní vlhkost
l	skupenské teplo	PP	doba návratnosti
M	hmotnostní průtok	NPV	čistá současná hodnota
M_m	molární hmotnost		
m	hmotnost		
n	počet trubek, segmentů, ...		
Nu	Nusseltovo číslo		
p	rozteč		
p	tlak		
P	příkon, energetická spotřeba		
Pr	Prandtlovo číslo		
Q	teplo, tepelný výkon		
Re	Reynoldsovo číslo		
S	plocha		
S	průtočný průřez		
t	čas		
t	teplota		
V	objem, objemový průtok		
W	obsah vody, vlhkost		

Indexy

<i>0</i>	počáteční stav	<i>VS</i>	suchý vzduch
<i>1m</i>	na 1 m délky	<i>VT</i>	výměník tepla
<i>BM</i>	biomasa	<i>VV</i>	vlhký vzduch
<i>bp</i>	brýdová pára	<i>v1</i>	voda na výstupu z kotle
<i>c</i>	celkový	<i>v2</i>	voda výstupu ze sušárny
<i>C</i>	mechanický nedopal; uhlík	<i>v3</i>	voda na výstupu z otopné soustavy
<i>CO</i>	chemický nedopal; oxid uhelnatý	<i>v4</i>	voda na výstupu z kondenzátoru
<i>d</i>	suchý stav	<i>vzd</i>	vzduch
<i>daf</i>	suchý stav bez popele		
<i>f</i>	tuhé zbytky		
<i>h</i>	hydraulický		
<i>k</i>	kotel		
<i>ln</i>	logaritmický		
<i>min</i>	minimální		
<i>ok</i>	okolí		
<i>p</i>	popel		
<i>pal</i>	palivo		
<i>pl</i>	plášť		
<i>r</i>	surový stav; propad roštem		
<i>S</i>	spaliny; plošný		
<i>s</i>	škvára		
<i>SS</i>	suché spaliny		
<i>stř</i>	střední		
<i>suš</i>	sušárna		
<i>SV</i>	vlhké spaliny		
<i>sv</i>	sdílení tepla		
<i>t</i>	stav v čase <i>t</i>		
<i>tr; TR</i>	trubka		
<i>ú</i>	úlet popílku		
<i>V</i>	vzduch; objemový		
<i>v</i>	výparný		
<i>v, w</i>	voda		

1 Úvod

V dnešní době je klíčovým tématem energetiky přechod od fosilních zdrojů ke zdrojům obnovitelným, mezi něž patří i biomasa. Nárůst spalování biomasy za účelem výroby tepla je znatelný jak v oblasti velkovýroby, tak i v menším domácím měřítku. Zásadním problémem biomasy však zůstává její vlhkost a vazba výhřevnosti biomasy na ni.

Tato práce se zabývá integrací sušárny biomasy do systému horkovodního vytápění spalujícího vlhkou biomasu. Práce je rozdělena do čtyř hlavních částí.

První částí je krátká rešerše obsahující popis biomasy a její sušení. Obsahuje kapitolu, která se věnuje obecnému popisu a definování pojmu biomasy a také popisu vlastností biomasy z hlediska paliv. Další kapitola krátce představuje základy sušení, jeho způsoby a základní typy sušáren k tomu používaných.

Druhá část je bilance konkrétního příkladu energetického systému. Součástí je výpočet účinnosti kotle pro spalování biomasy a srovnání systému spalujícího přímo vlhkou biomasu a systému s integrovaným sušením biomasy.

Třetí část se věnuje návrhu sušárny a kondenzátoru brýdových par ze sušení, které jsou použity k ohřevu zpětné vody z otopné soustavy. Součástí je měření na experimentální sušce, které proběhlo v laboratořích ústavu energetiky ČVUT a jeho vyhodnocení. O výsledky tohoto měření se pak opírá samotný návrh sušárny. Další část je návrh kondenzátoru, který vychází z konkrétního případu uvažovaného v bilanci. Stěžejní v této části bylo odhadnout hlavní rozměry obou zařízení.

V poslední části byla provedena základní ekonomická analýza celého systému, potažmo integrace sušení. Na základě rozměrů sušárny a výměníku z předchozí části bylo možné odhadnout investiční náklady. Z porovnání cen a spotřeby paliva pro obě varianty pak bylo možné určit provozní náklady. Z obojího bylo následně možné posoudit výhodnost integrace sušení do energetického systému z hlediska ekonomiky.

2 Biomasa

2.1 Definice

Pod pojmem biomasa se rozumí veškerý materiál organického původu, tj. obsahující uhlovodíky. Biomasa proto obecně zahrnuje:

- v přírodě žijící fytomasu a zoomasu (rostliny a živočichové),
- zbytky a produkty jejich existence (např. exkrementy zvířat),
- odumřelou, ale nikoliv fosilní fytomasu a zoomasu (např. sláma, suché listí),
- a dále v tomto smyslu veškerý materiál, který vznikl technologickou přeměnou z předchozích, např. papír, odpady z jatek, organická část domovního odpadu.

Protože materiály organického původu obsahující uhlovodíky jsou i ropa, zemní plyn a uhlí, je třeba zavést hranici mezi fosilními palivy (fosilní biomasou) a biomasou. Tímto ohraničením je rašelina, která již do biomasy není zahrnována. Biomasa je tedy materiál organického původu, u kterého nedošlo k procesu fosilizace. [1]

2.2 Rozdělení

Z hlediska původu vzniku se biomasa dělí na primární a sekundární. Jako primární biomasa se označují takové materiály, které vznikly přímou fotosyntézou, tj. veškerá rostlinná biomasa. Naproti tomu jako sekundární biomasa jsou označovány organické produkty vzniklé bez přímého působení slunce, typicky zoomasu a produkty její existence.

Primární biomasa se pak dále dělí na fytomasu, tedy rostlinnou biomasu, a dendromasu neboli dřevní biomasu. [1]

2.3 Biomasa jako palivo

Biomasu lze považovat za tuhé palivo podobně jako např. uhlí. Proto pro ni platí i základní vztah pro tuhá paliva. Tedy, že palivo se skládá ze tří složek – hořlaviny (h), popelovin (A) a vody (W).

$$h + A + W = 1$$

Hořlavinu lze dále rozdělit na tzv. prchavou (V) a fixní (F).

Při hrubém a prvkovém rozboru se zavádějí různé stavy paliva, z nichž tři nejdůležitější jsou:

- r (raw, real) – skutečný (původní) stav – viz vztah
- d (dry) – bezvodý stav – $h + A = 1$

- *daf* (dry ash-free) – stav bez vody a popelovin – $h = 1$

Stejně jako pro jiná tuhá paliva i pro biomasu platí, že její hořlavina je tvořena 5 základními prvky.

$$C^{daf} + H^{daf} + S^{daf} + N^{daf} + O^{daf} = h$$

C, H a S jsou aktivními prvky hořlaviny, zatímco N a O jsou pasivními prvky hořlaviny. Z hlediska spalování je žádoucí, aby obsah S a N byl co nejnižší z důvodu emisí SO₂ a NO_x. [2]

2.3.1 Složení biomasy

Obsah uhlíku (C), vodíku (H) a kyslíku (O) v hořlavině biomasy je přibližně stejný pro různé druhy biomasy. Obsah uhlíku je vyšší u dřevní biomasy – 47-50%, u nedřevní 43-48%. Obsah vodíku se pohybuje okolo 5-7% a kyslíku 40-45%.

Obsah síry (S) v biomase je oproti např. uhlí velmi nízký; pohybuje se řádově v desetinách až setinách procent.

Podíl dusíku (N) se výrazně liší pro různé druhy biomasy. Jeho obsah se pohybuje od cca 0,1-4%. Nejvíce dusíku se obecně nachází v obilovinách, kde jsou jeho zdrojem dusíkatá hnojiva. Nejméně dusíku se nachází v dřevinách.

Podíly ostatních prvků – K, Cl, Ca, Mg, P – dosahují nanejvýš 1% a jejich obsah je závislý převážně na způsobu hnojení, lokalitě a typu půdy. [2]

2.3.2 Energetické parametry

Mezi kvalitativní parametry paliva z biomasy patří hlavně výhřevnost a spalné teplo a obsah vody a popelovin. Výhřevnost biomasy závisí zejména na obsahu vody; výhřevnost sušiny se pohybuje okolo hodnoty 18,5 MJ/kg.

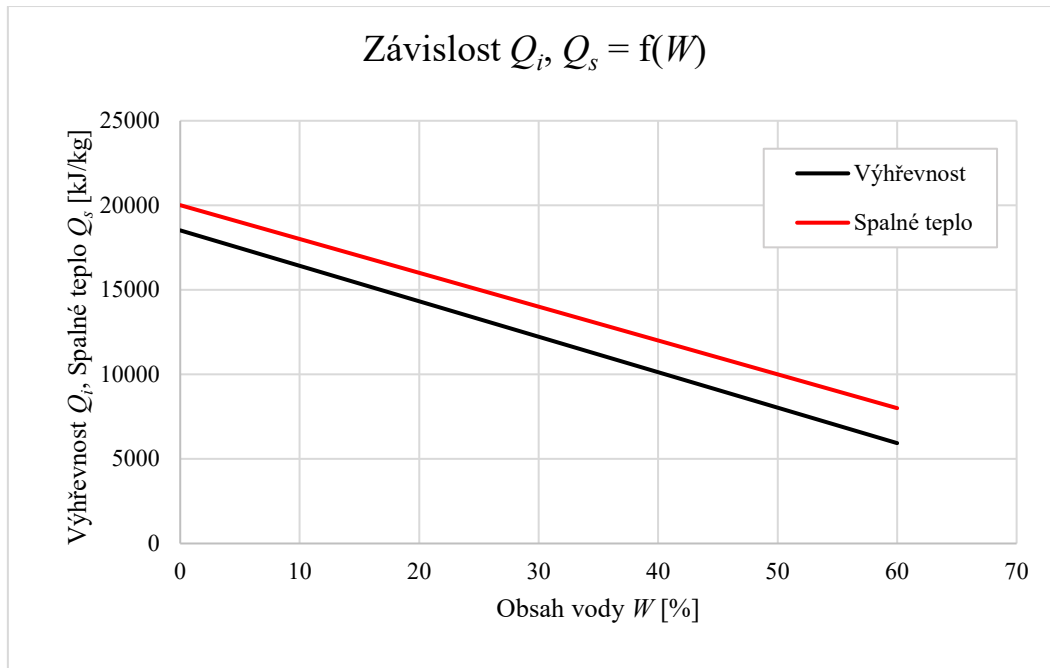
Biomasa je charakteristická vysokým obsahem prchavé hořlaviny, vysokým podílem vody, a naopak nízkým podílem popelovin.

2.3.2.1 Obsah vody

Voda v palivu je balastní složka. Obsah vody v biomase se velmi liší v závislosti na typu biomasy – původu rostliny, druhu rostliny a způsobu zpracování. Biomasa vysušená na vzduchu obsahuje okolo 10-12% vody, naproti tomu čerstvá kůra nebo fytomasa může obsahovat až 60% vody.

Obsah vody zásadním způsobem ovlivňuje charakter biomasy. Vyšší obsah vody má za následek:

- snížení výhřevnosti
- větší náchylnost k biologické degradaci
- zvýšení nákladů na dopravu a skladování



Obrázek 2-1: Závislost výhřevnosti a spalného tepla paliva na obsahu vody

2.3.2.2 Obsah popelovin

Popeloviny jsou stejně jako voda balastní složkou. Obsah popelovin u běžné rostlinné biomasy se pohybuje cca od 0,1 do zhruba 6%, nejméně popelovin obsahuje dřevo (okolo 0,5%), kůra obsahuje cca 1% a například sláma 4-6 %. [2]

3 Sušení biomasy

Z předchozí kapitoly je patrné, že výhřevnost biomasy je silně závislá na obsahu vody. Důvod, proč sušit biomasu, je tedy nasnadě. Mimo zvýšení výhřevnosti biomasy se také suchá biomasa oproti té vlhké lépe skladuje a transportuje. Snížení obsahu vody biomasy je příznivé rovněž z hlediska kvality spalování. Při spalování vlhké biomasy může docházet k nedokonalému spalování a tím pádem ke zvýšení emisí CO, dehtu a dalších nežádoucích látek.

3.1 Metody sušení

3.1.1 Pasivní sušení

Pasivní neboli přirozené sušení je nejstarší a nejjednodušší způsob odstraňování vlhkosti. Materiál lze takto sušit pod přístřeškem, popř. na volném vzduchu nebo na přímém slunci. Voda se samovolně na povrchu odpařuje a pára difunduje do okolního vzduchu.

Tento způsob je sice nejlevnější, protože vyžaduje nejméně energie, ale je zároveň i nejpomalejší a také není vhodný pro některé spalovací a zplyňovací systémy nebo pro výrobu pelet. [3]

3.1.2 Aktivní sušení

Naproti tomu aktivní (umělé) sušení je proces, který vyžaduje vstup energie z vnějšího zdroje, aby se proces sušení urychlil a snížila se hodnota celkové vlhkosti. Využití této energie znamená dodatečné náklady a navýšení vložené energie.

Aktivní sušení probíhá v sušárnách (suškách). Vzhledem ke značně rozmanitým požadavkům na sušený materiál existuje mnoho typů sušáren. Liší se především způsobem, jakým se dodává energie potřebná k sušení a způsobem dopravy materiálu sušárnou. K ohřevu materiálu může být použito nevyužité teplo z různých procesů, nebo je využita přímá vytápěcí jednotka. [3]

3.2 Mechanismy sušení

Mechanismem sušení se rozumí, jakým způsobem se voda separuje od biomasy. Nejběžnějším mechanismem sušení je sušení tepelné, kdy je biomase, resp. vodě v ní, dodávána energie v podobě tepla. To vede ke zvýšení teploty vody a jejímu odpaření.

3.2.1 Tepelné

Tepelné sušení lze dále rozdělit podle způsobu, jakým je teplo vodě dodáváno. [4]

3.2.1.1 Kontaktní

Při kontaktním sušení se teplo předává sušenému materiálu vedením z vyhřívané plochy, např. kovového svazku trubek nebo vyhřívaného pláště nádoby.

3.2.1.2 Konvekční

Teplo přestupuje na povrch materiálu z proudícího plynu (horkého vzduchu, spalin apod.), který je se sušeným materiálem v bezprostředním styku.

3.2.1.3 Radiační

Radiační sušení se používá k dosušování, povrch materiálu je zahříván infračerveným zářením o vlnové délce 1-2 μm .

3.2.1.4 Mikrovlnné

Energie, resp. teplo je předáváno elektromagnetickým zářením o frekvenci 2450 MHz. Toto mikrovlnné záření rozkmitává molekuly vody a tím zvyšuje jejich teplotu.

3.2.2 Mechanické

Mechanické sušení, resp. odstranění části vlhkosti filtrací, lisováním nebo odstředěním.

3.2.3 Fyzikálně-chemické

Sušení může probíhat i fyzikálně-chemickými procesy pomocí hygroskopických látek - absorpcí (např. CaCl_2 , MgCl_2) a adsorpcí (silikagel).

3.2.4 Vymrazování

Vymrazování neboli lyofilizace je proces sušení mrazem. Nejprve dojde ke zmrazení materiálu na nízkou teplotu a tím přeměny vody v ledové krystaly. Následně je voda za nízkého tlaku a teploty sublimována do vodní páry.

3.3 Typy sušek

Sušárny biomasy lze rozdělit podle několika kritérií. První již bylo nastíněno v předchozí kapitole; jedná se o dělení podle mechanismu sušení, popř. v případě nejrozšířenějšího tepelného sušení lze mluvit i o dělení podle způsobu ohřevu materiálu.

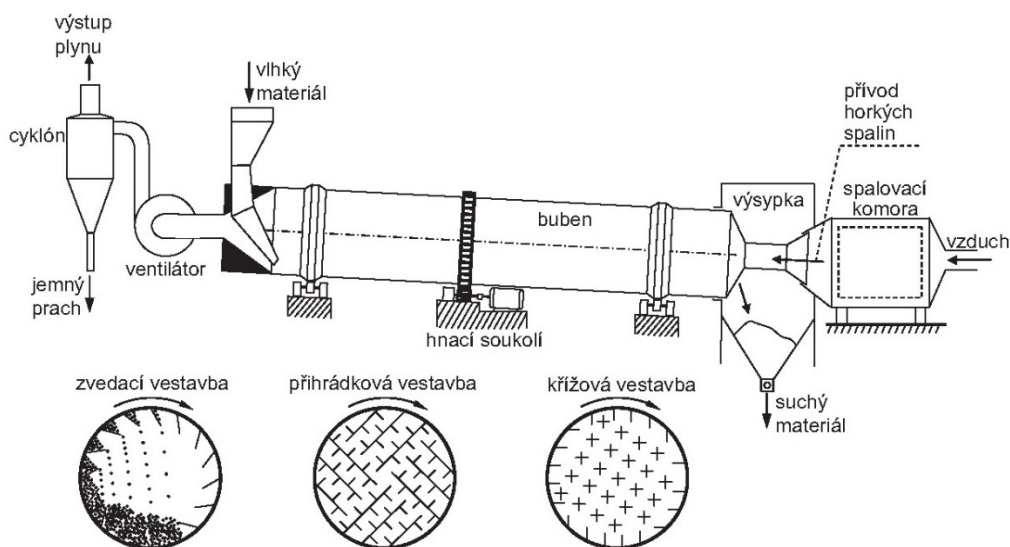
Další dělení je podle režimu provozu – kontinuální a diskontinuální (vsázkové, periodické). Sušený materiál je v sušárnách buď v klidu nebo je mechanicky či pneumaticky přesouván.

Posledním důležitým způsobem dělení je konstrukce sušárny, ty mohou být komorové, tunelové, šachtové, pásové, bubnové, válcové atd.

K dalším kritérium patří směr pohybu sušícího média a sušícího materiálu, provozní tlak sušícího prostředí, cirkulace sušícího média, druh míchání sušeného materiálu, ... [5; 4]

3.3.1 Rotační bubnová

Rotační bubnová sušárna je mírně skloněný (do 6°) válec 3 až 15 m dlouhý o průměru 1 až 3 m, který se otáčí rychlostí 1 až 8 ot/min. Sušárna může být opatřena vnitřními vestavbami, které zajišťují lepší promíchávání materiálu a v případě přímého ohřevu také intenzivnější styk se sušícím médiem. Vlhký a sypký materiál je vnášen do horní části sušárny tak, aby naplnil asi 20% objemu válce. Sušárna je vyhřívána buď přímo proudem horkého vzduchu, nebo spalin, anebo nepřímo pláštěm v případě, že nesmí dojít ke znečištění sušeného materiálu. [5]

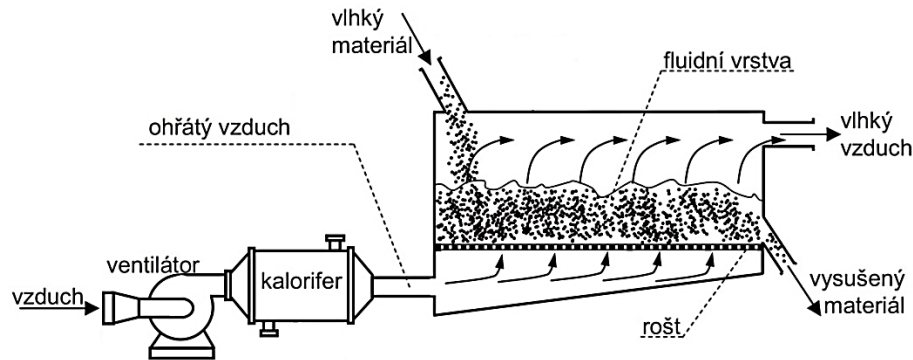


Obrázek 3-1: Rotační bubnová sušárna [4]

3.3.2 Fluidní

Fluidní sušárna je zařízení, ve kterém je realizováno přímé sušení z objemu materiálu. Horký vzduch o teplotě 100 až 200°C prochází objemem vlhkého materiálu, který je kontinuálně uváděn na mírně skloněný děrovaný rošt, který může být nepohyblivý nebo může horizontálně vibrovat. Vzduch je uváděn pod rošt v takovém množství, aby materiál byl ve vlnosku, jeho částice se vzájemně nedotýkaly, ale aby nebyl unášen proudem plynu ze sušárny.

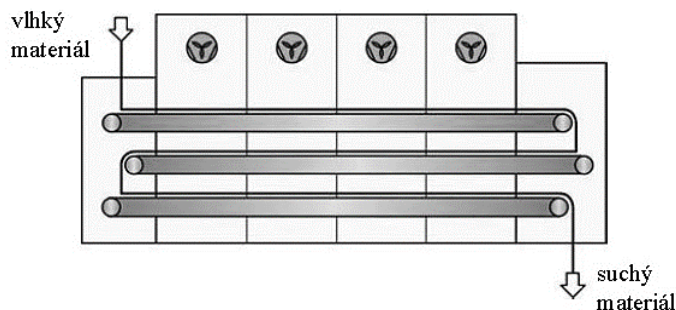
V tomto tzv. „fluidním“ stavu se všechny částice neustále pohybují, promíchávají a mají velmi dobrý kontakt se sušícím médiem. Proto sušení probíhá rychle s tepelnou účinností vyšší než u jiných typů sušáren. [5]



Obrázek 3-2: Fluidní suška [4]

3.3.3 Pásová

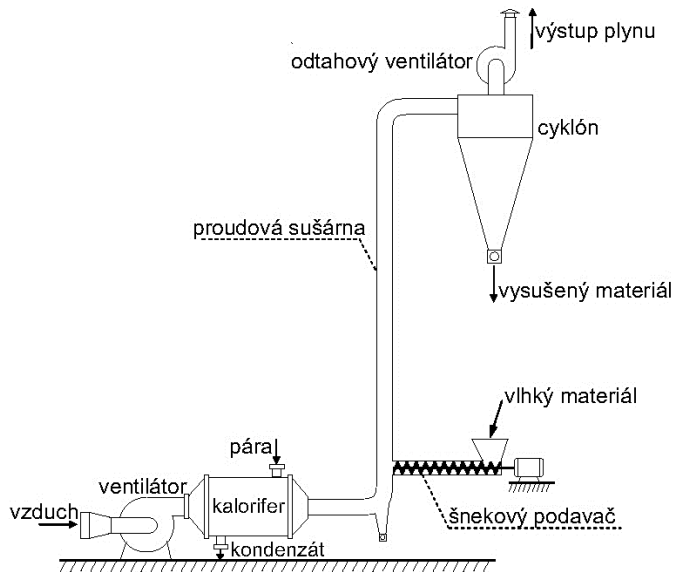
Pásová sušárna je typem sušárny s přímým sušením z povrchu. Sestává z jednoho nebo několika pod sebou umístěných pásových dopravníků, které se pohybují v opačném směru. Mokrý materiál je nanášen na horní dopravník tak, aby tvořil nepřiliš vysokou vrstvu o stejné tloušťce. Nad pásy dopravníků proudí vzduch o teplotě obvykle 80 až 150 °C protiproudě vzhledem k pohybu materiálu. Pokud jsou pásy perforované, vzduch prochází sušeným materiálem a jde o sušení z objemu. Zařízení se vyznačuje dlouhou dobou sušení a kontinuálním provozem. [5]



Obrázek 3-3: Pásová suška [5]

3.3.4 Pneumatická (proudová)

Sušící medium (proud horkého vzduchu) suší a současně dopravuje materiál. Materiál je dávkován, např. šnekovým dávkovačem, do proudu plynu o rychlosti 10 až 40 m/s. Materiál je dopravován 10 až 20 m dlouhým potrubím, kde dochází k sušení. Suchý materiál je oddělen z proudu plynu v cyklonu. V případě, že se jemné částice materiálu v cyklonu nezachytí, je za cyklonem zařazen ještě filtr. Proudová sušárna pracuje v kontinuálním režimu. [5; 4]

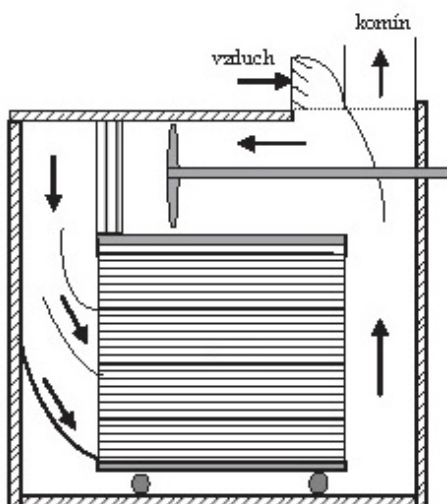


Obrázek 3-4: Proudová suška [4]

3.3.5 Komorová

Komorová sušárna pracuje vsádkově. Sušárna je v podstatě uzavřená a tepelně izolovaná skříň, do které se zaveze vozík s patry, na nichž je umístěn vlhký materiál. Sušený materiál je umístěn buď na lískách¹, které umožňují průchod sušícího plynu, nebo na deskách a sušící plyn proudí podél vrstvy sušeného materiálu.

Teplý vzduch je uváděn do pohybu ventilátorem a je ohříván tepelným výměníkem vytápěným parou. Část vlhkého vzduchu se po průchodu nad lískami odvádí do komína, zbytek cirkuluje dál a do zařízení se přisává nový vzduch. [5; 4]



Obrázek 3-5: Komorová suška [5]

¹ Deska vyrobená z latí nebo proutí

4 Návrh energetického systému pro spalování biomasy

Návrh a celá kapitola 4 částečně čerpá ze zdroje [6].

4.1 Zadání

Cílem kapitoly je navrhnout energetický systém horkovodního vytápění se spalováním biomasy. Důraz je kladen na srovnání systému bez sušení biomasy a s jejím sušením. Je třeba prokázat, že integrace sušení vede ke snížení spotřeby paliva a zvýšení celkové účinnosti systému.

Stěžejní částí je určení účinnosti kotle pro paliva o různých hodnotách obsahu vody. K tomu je nejprve nutné provést přepočít složení paliva a následně stechiometrické výpočty. Jakmile je známa účinnost kotle, je možné porovnat oběh bez a se sušením biomasy.

Kromě zadaného konkrétního paliva, jehož prvkové složení je v tabulce níže, máme zadáno, že výkon otopné soustavy je 1 MW a teplotní spád je 120/70°C.

4.1.1 Složení paliva

Do obou systémů přichází palivo, jehož parametry jsou zobrazeny v *Tabulka 4-1*.

Vlhkost	W^r	0,6
Popel v sušině	A^d	0,016
Uhlík v hořlavině	C^{daf}	0,5096
Vodík v hořlavině	H^{daf}	0,0693
Dusík v hořlavině	N^{daf}	0,0026
Síra v hořlavině	S^{daf}	0,0001
Kyslík v hořlavině	O^{daf}	0,4184
Spalné teplo hořlaviny paliva	Q_s^{daf} [kJ/kg]	20334

Tabulka 4-1: Složení zadaného paliva

4.2 Přepočít složení paliva

Pro přepočít paliva na surový stav o různých hodnotách vlhkosti slouží *Tabulka 4.2-1*. Přepočítová tabulka funguje pro obsahy jednotlivých prvků a spalné teplo, nikoliv však pro výhřevnost. K přepočtu spalného tepla na výhřevnost pak slouží vztah (4.2-1). Níže je uveden vzorový výpočet pro konkrétní hodnoty.

přepočítat na přepočítat z		surový stav	bezvodé palivo	hořlavinu
		r	d	daf
surového stavu	r	1	$\frac{1}{1 - W^r}$	$\frac{1}{1 - W^r - A^r}$
bezvodého paliva	d	$1 - W^r$	1	$\frac{1}{1 - A^d}$
hořlaviny	daf	$1 - W^r - A^r$	$1 - A^d$	1

Tabulka 4-2: Převodní tabulka pro přepočítání paliva

$$Q_i = Q_s - 2453 \cdot 8,91 \cdot H \quad [kJ/kg] \quad (4.2-1)$$

Příklad výpočtu:

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) = 0,016 \cdot (1 - 0,6) = 0,0064$$

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 0,0693 \cdot (1 - 0,6 - 0,0064) = 0,0273$$

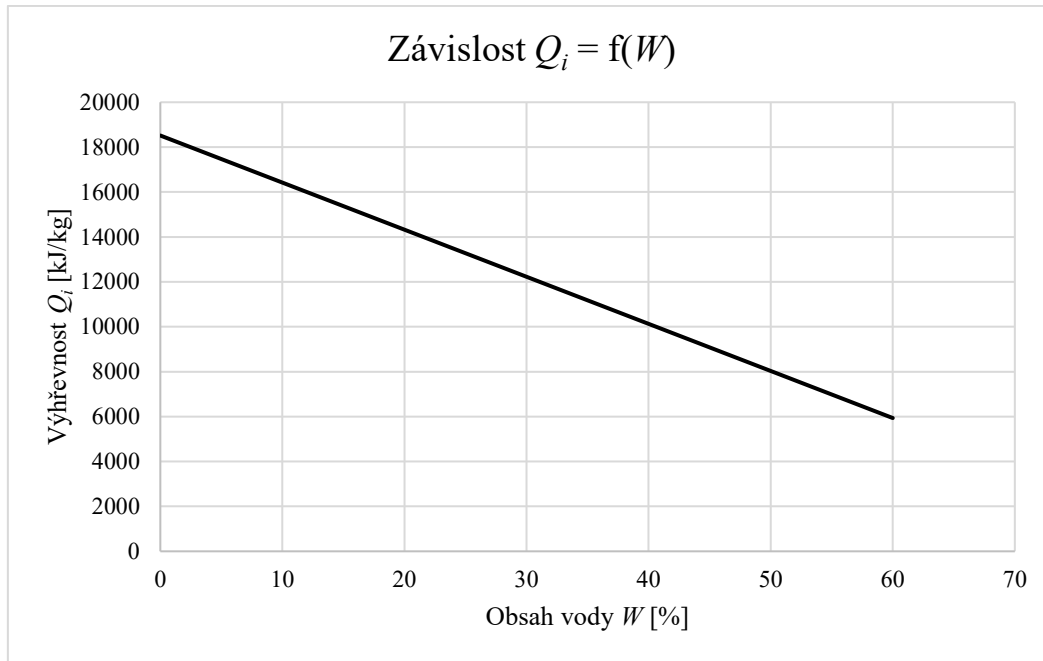
$$Q_s^r = Q_s^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) = 20334 \cdot (1 - 0,6 - 0,0064) = 8003,462 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_i^r = Q_s^r - 2453 \cdot 8,91 \cdot H^r = 8003,462 - 2453 \cdot 8,91 \cdot 0,0273 = 5935,501 \text{ kJ/kg}$$

Výsledkem je následně *Tabulka 4-3*, kde jsou vypočteny obsahy všech prvků v palivu pro různé úrovně vlhkosti. Zároveň jsou v tabulce zaznamenány hodnoty výhřevnosti a spalného tepla.

	r [60%]	r [50%]	r [40%]	r [30%]	r [20%]	r [10%]	d	daf
C	0,200579	0,250723	0,300868	0,351012	0,401157	0,451302	0,501446	0,5096
O	0,164682	0,205853	0,247023	0,288194	0,329364	0,370535	0,411706	0,4184
H	0,027276	0,034096	0,040915	0,047734	0,054553	0,061372	0,068191	0,0693
N	0,001023	0,001279	0,001535	0,001791	0,002047	0,002303	0,002558	0,0026
S	$3,94 \cdot 10^{-5}$	$4,92 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$6,89 \cdot 10^{-5}$	$7,87 \cdot 10^{-5}$	$8,86 \cdot 10^{-5}$	$9,84 \cdot 10^{-5}$	0,0001
A	0,0064	0,008	0,0096	0,0112	0,0128	0,0144	0,016	0
W	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0	0
Q_i	5935,501	8032,627	10129,75	12226,88	14324	16421,13	18518,25	18819,36
Q_s	8003,462	10004,33	12005,19	14006,06	16006,92	18007,79	20008,66	20334

Tabulka 4-3: Prvkové složení paliva pro různé vlhkosti



Graf 4-1: Závislost výhřevnosti paliva na obsahu vody

4.3 Stechiometrie

Stechiometrické výpočty slouží ke stanovení objemu vzduchu potřebného pro spalování a objemu vzniknuvších spalín. Vzorové výpočty jsou provedeny pro palivo o vlhkosti 60%.

4.3.1 Minimální objem kyslíku

Z rovnic pro spalovací reakce uhlíku, vodíku a síry a jejich molárních hmotností a objemů byl stanoven vztah (4.3-1).

$$V_{O_2\min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (4.3-1)$$

$$V_{O_2\min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,200579}{12,01} + \frac{0,027276}{4,032} + \frac{3,94 \cdot 10^{-5}}{32,06} - \frac{0,164682}{32} \right)$$

$$\underline{V_{O_2\min} = 0,4102 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{\text{pal}}}$$

4.3.2 Minimální objem suchého vzduchu

Vzduch obsahuje cca 21% kyslíku, a tak tedy můžeme snadno zjistit minimální objem vzduchu podle vztahu (4.3-2).

$$V_{V\text{smin}} = \frac{V_{O_2\min}}{0,21} \quad (4.3-2)$$

$$V_{V\text{smin}} = \frac{0,4102}{0,21}$$

$$\underline{V_{V\text{smin}} = 1,9534 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{\text{pal}}}$$

4.3.3 Minimální objem vlhkého vzduchu

Ve vztahu (4.3-3) se vyskytuje součinitel κ , jež zohledňuje obsah vodní páry ve vzduchu. Pro normální podmínky – $t_{vzd} = 20^\circ C$ a $\varphi = 60\%$ – se tento součinitel uvažuje $\kappa = 1,016$.

$$V_{VVmin} = V_{VSmin} \cdot \kappa \quad (4.3-3)$$

$$V_{VVmin} = 1,9534 \cdot 1,016$$

$$\underline{V_{VVmin} = 1,9846 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}}$$

4.3.4 Objem vodní páry ve vzduchu

$$V_{H_2O}^V = (\kappa - 1) \cdot V_{VSmin} \quad (4.3-4)$$

$$V_{H_2O}^V = (1,016 - 1) \cdot 1,9534$$

$$\underline{V_{H_2O}^V = 0,0312 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}}$$

4.3.5 Minimální objem suchých spalin

Minimální objem suchých spalin se určí jako součet objemů hlavních složek spalin.

$$V_{SSmin} = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{SO_2} + V_{Ar} \quad (4.3-5)$$

$$V_{SSmin} = 0,3723 + 1,5254 + 2,69 \cdot 10^{-5} + 0,018$$

$$\underline{V_{SSmin} = 1,9158 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}}$$

4.3.5.1 Objem oxidu uhličitého ve spalinách

$$V_{CO_2} = \left(\frac{22,26}{12,01} \right) \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{VSmin} \quad (4.3-6)$$

$$V_{CO_2} = \left(\frac{22,26}{12,01} \right) \cdot 0,2006 + 0,0003 \cdot 1,9534$$

$$V_{CO_2} = 0,3723 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}$$

4.3.5.2 Objem dusíku ve spalinách

$$V_{N_2} = \left(\frac{22,4}{28,016} \right) \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{VSmin} \quad (4.3-7)$$

$$V_{N_2} = \left(\frac{22,4}{28,016} \right) \cdot 0,001 + 0,7805 \cdot 1,9534$$

$$V_{N_2} = 1,5254 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}$$

4.3.5.3 Objem oxidu siřičitého ve spalínách

$$V_{SO_2} = \left(\frac{21,89}{32,06} \right) \cdot S^r \quad (4.3-8)$$

$$V_{SO_2} = \left(\frac{21,89}{32,06} \right) \cdot 3,94 \cdot 10^{-5}$$

$$V_{SO_2} = 2,69 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}$$

4.3.5.4 Objem argonu ve spalínách

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{VSmin} \quad (4.3-9)$$

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot 1,9534$$

$$V_{Ar} = 0,018 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}$$

4.3.6 Minimální objem vlhkých spalín

Minimální objem vlhkých spalín se určí pouze jako součet minimálního objemu suchých spalín a objemu vodní páry ve spalínách.

$$V_{SVmin} = V_{SSmin} + V_{H_2O}^S \quad (4.3-10)$$

$$V_{SVmin} = 1,9158 + 1,0782$$

$$\underline{V_{SVmin} = 2,9939 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}}$$

4.3.6.1 Objem vodní páry ve spalínách

$$V_{H_2O}^S = \left(\frac{22,39}{18,06} \right) \cdot W^r + \left(\frac{44,8}{4,032} \right) \cdot H^r + V_{H_2O}^V \quad (4.3-11)$$

$$V_{H_2O}^S = \left(\frac{22,39}{18,06} \right) \cdot 0,6 + \left(\frac{44,8}{4,032} \right) \cdot 0,0273 + 0,0312$$

$$\underline{V_{H_2O}^S = 1,0782 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}}$$

4.3.7 Objem suchých spalín při přebytku vzduchu α

Pro konkrétní součinitel přebytku vzduchu α , který se v našem případě rovná $\alpha = 1,6$, se určí objem suchých spalín podle vztahu (4.3-12).

$$V_{SS} = V_{SSmin} + (\alpha - 1) \cdot V_{VSmin} \quad (4.3-12)$$

$$V_{SS} = 1,9158 + (1,6 - 1) \cdot 1,9534$$

$$\underline{V_{SS} = 3,0878 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{pal}}$$

W^r	60	50	40	30	20	10	%
V_{O_2min}	0,410204	0,512755	0,615306	0,717857	0,820409	0,92296	Nm^3/kg_{pal}
$V_{V_{Smin}}$	1,953354	2,441692	2,930031	3,418369	3,906707	4,395046	
$V_{V_{Vmin}}$	1,984607	2,480759	2,976911	3,473063	3,969215	4,465367	
$V_{H_2O}^V$	0,031254	0,039067	0,04688	0,054694	0,062507	0,070321	
V_{CO_2}	0,372349	0,465437	0,558524	0,651612	0,744699	0,837786	
V_{N_2}	1,525411	1,906764	2,288116	2,669469	3,050822	3,432174	
V_{SO_2}	$2,69 \cdot 10^{-5}$	$3,36 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$5,37 \cdot 10^{-5}$	$6,05 \cdot 10^{-5}$	
V_{Ar}	0,017971	0,022464	0,026956	0,031449	0,035942	0,040434	
V_{SSmin}	1,915758	2,394697	2,873637	3,352576	3,831516	4,310455	
$V_{H_2O}^S$	1,078179	1,037785	0,997391	0,956997	0,916603	0,876208	
V_{SVmin}	2,993937	3,432483	3,871028	4,309573	4,748119	5,186664	
V_{SS}	3,08777	3,859713	4,631655	5,403598	6,17554	6,947483	

Tabulka 4-4: Stechiometrické poměry pro paliva různé vlhkosti

4.4 Účinnost kotle

Účinnost kotle se stanovuje tzv. nepřímou metodou, kdy se nejprve vypočítají jednotlivé ztráty kotle a následně se odečtou od sta procent, viz vztah (4.4-1).

$$\eta = 1 - \sum Z_i = 1 - Z_k - Z_C - Z_{CO} - Z_f - Z_{sv} \quad (4.4-1)$$

Jednotlivé ztráty jsou:

- ztráta citelným teplem spalin (tzv. komínová) Z_k ,
- ztráta mechanickým nedopalem Z_C ,
- ztráta chemickým nedopalem Z_{CO} ,
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f ,
- ztráta sdílením tepla do okolí Z_{sv} .

Vzorové výpočty jsou uváděny opět pro palivo o vlhkosti 60%.

4.4.1 Zadání

4.4.1.1 Parametry kotle

Uvažujeme roštový horkovodní kotel s pásovým roštem na biomasu. Kotle na biomasu mají téměř vždy vícestupňový přívod spalovacího vzduchu, pro zjednodušení však předpokládáme pouze jednostupňový přívod spalovacího vzduchu. Rovněž předpokládáme, že nedochází k recirkulaci spalin.

- Přebytek spalovacího vzduchu $\alpha = 1,6$
- Teplota okolního vzduchu (kotelny) $t_{ok} = 25^{\circ}\text{C}$
- Teplota odchozích spalin $t_k = 200^{\circ}\text{C}$

4.4.1.2 Charakteristiky popela a spalin

- Obsah uhlíku ve škváře $C_s = 0,16$
- Obsah uhlíku v propadu $C_r = 0,3$
- Obsah uhlíku v úletu $C_{\dot{u}} = 0,22$
- Podíl popela ve škváře $X_s = 0,74$
- Podíl popela v propadu $X_r = 0,06$
- Podíl popela v úletu $X_{\dot{u}} = 0,15$
- Teplota popela $t_p = 600^{\circ}\text{C}$
- Entalpie popela $h_p(600^{\circ}\text{C}) = 558 \text{ kJ/kg}$
- Koncentrace CO ve spalinách $\omega_{CO} = 550 \text{ ppm}$
- Výhřevnost CO $Q_i^{CO} = 12640 \text{ kJ/kg}$

4.4.2 Ztráta mechanickým nedopalem

Představuje ztrátu nespálenou hořlavinou (zejména uhlíkem) v tuhých zbytcích.

$$Z_C = 32700 \cdot \frac{A^r}{Q_i^r} \cdot \left(\frac{C_s}{1 - C_s} \cdot X_s + \frac{C_r}{1 - C_r} \cdot X_r + \frac{C_{\dot{u}}}{1 - C_{\dot{u}}} \cdot X_{\dot{u}} \right) \quad (4.4-2)$$

$$Z_C = 32700 \cdot \frac{0,0064}{5935,501} \cdot \left(\frac{0,16}{1 - 0,16} \cdot 0,74 + \frac{0,3}{1 - 0,3} \cdot 0,06 + \frac{0,22}{1 - 0,22} \cdot 0,15 \right)$$

$$\underline{Z_C = 7,368 \cdot 10^{-3}}$$

W^r [%]	60	50	40	30	20	10
Z_C [-]	0,007368	0,006806	0,006476	0,00626	0,006106	0,005992

Tabulka 4-5: Ztráta mechanickým nedopalem pro různé hodnoty vlhkosti paliva

4.4.3 Ztráta chemickým nedopalem

Vyjadřuje teplo ztracené v důsledku přítomnosti nespálených plynů ve spalinách.

$$Z_{CO} = V_{SS} \cdot \frac{\sum q_i}{Q_i^r} = V_{SS} \cdot \frac{\omega_{CO} \cdot Q_i^{CO}}{Q_i^r} \quad (4.4-3)$$

$$Z_{CO} = 3,0878 \cdot \frac{550 \cdot 10^{-6} \cdot 12640}{5935,501}$$

$$\underline{Z_{CO} = 3,617 \cdot 10^{-3}}$$

W^r [%]	60	50	40	30	20	10
Z_{CO} [-]	0,003617	0,00334	0,003179	0,003072	0,002997	0,002941

Tabulka 4-6: Ztráta chemickým nedopalem pro různé hodnoty vlhkosti paliva

4.4.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Představuje ztrátu tepla, jež zůstalo v popelu.

$$Z_f = \frac{A^r}{Q_i^r} \cdot \left(\frac{h_p \cdot X_s}{1 - C_s} + \frac{h_p \cdot X_r}{1 - C_r} + \frac{h_p \cdot X_u}{1 - C_u} \right) \quad (4.4-4)$$

$$Z_f = \frac{0,0064}{5935,501} \cdot \left(\frac{558 \cdot 0,74}{1 - 0,16} + \frac{558 \cdot 0,06}{1 - 0,3} + \frac{558 \cdot 0,15}{1 - 0,22} \right)$$

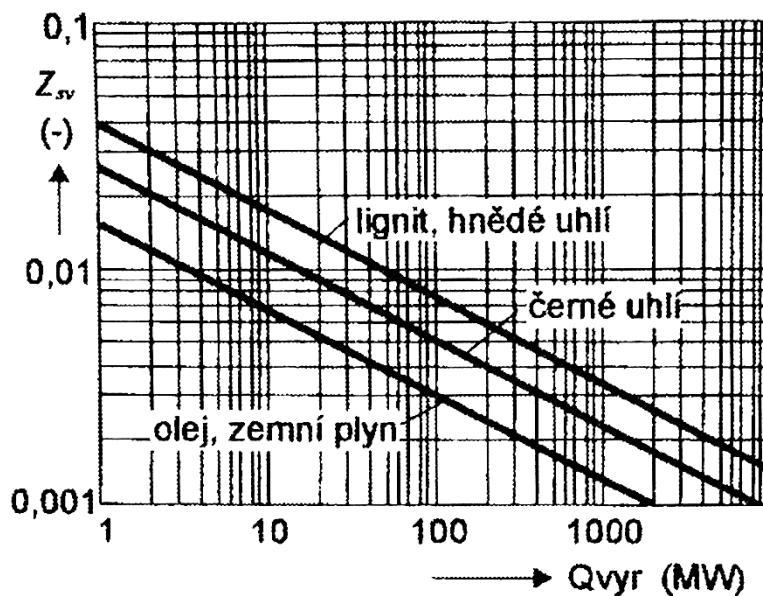
$$Z_f = 6,97 \cdot 10^{-4}$$

W^r [%]	60	50	40	30	20	10
Z_f [-]	0,000697	0,000644	0,000613	0,000592	0,000578	0,000567

Tabulka 4-7: Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků pro různé hodnoty vlhkosti paliva

4.4.5 Ztráta sdílením tepla do okolí

Jinak také zvána jako ztráta sáláním a vedením. Zohledňuje množství tepla, které uniká pláštěm kotle do okolí. Velikost ztráty se obvykle určuje z diagramu, jako je například Graf 4-2.



Graf 4-2: Ztráta sdílením tepla do okolí

Biomasa je podobně nekvalitní palivo jako lignit nebo hnědé uhlí. Ztráta sdílením tak byla stanovena na $Z_{sv} = 0,03$. Tato ztráta jako jediná není závislá na vlhkosti paliva; je závislá na velikosti jednotky (kotle) a typu spalovaného paliva.

4.4.6 Ztráta citelným teplem spalin (komínová)

Komínová ztráta představuje teplo odcházející z kotle v kouřových plynech. Jedná se o ztrátu nejvýznamnější, která nejvíce ovlivňuje výslednou účinnost kotle. Pro její určení je třeba stanovit entalpii spalin pro teplotu odcházejících spalin z kotle a pro teplotu okolí (v kotelně).

t [°C]	200	25
h_{CO_2} [kJ/Nm ³]	357,5	41,62
h_{N_2} [kJ/Nm ³]	259,9	32,53
h_{SO_2} [kJ/Nm ³]	394,0	46,81
h_{Ar} [kJ/Nm ³]	186,0	23,32
h_{H_2O} [kJ/Nm ³]	304,5	39,10
h_{pop} [kJ/kg]	170,0	20,20
h_{vzd} [kJ/Nm ³]	266,2	32,57

Tabulka 4-8: Entalpie jednotlivých složek spalin

$$Z_k = (1 - Z_C) \cdot \frac{I_S^{t_k, \alpha} - I_S^{t_{ok}, \alpha}}{Q_i^r} \quad (4.4-5)$$

$$I_{S, min}^{t, \alpha} = V_{CO_2} \cdot h_{CO_2} + V_{N_2} \cdot h_{N_2} + V_{SO_2} \cdot h_{SO_2} + V_{Ar} \cdot h_{Ar} + V_{H_2O}^S \cdot h_{H_2O} + A^r \cdot X_{\dot{u}} \cdot h_{pop} \quad (4.4-6)$$

$$I_{V, min}^{t, \alpha} = V_{Smin} \cdot h_{vzd} + V_{H_2O}^V \cdot h_{H_2O} \quad (4.4-7)$$

$$I_S^{t, \alpha} = I_{S, min}^{t, \alpha} + (\alpha - 1) \cdot I_{V, min}^{t, \alpha} \quad (4.4-8)$$

$$\underline{t_k = 200^\circ C}$$

$$I_{S, min}^{t_k, \alpha} = 0,3723 \cdot 357,5 + 1,5254 \cdot 259,9 + 2,69 \cdot 10^{-5} \cdot 394 + 0,018 \cdot 186 + 1,0782 \cdot 304,5 + 0,0064 \cdot 0,15 \cdot 170$$

$$\underline{I_{S, min}^{t_k, \alpha} = 861,3912 \text{ kJ/kg}}$$

$$I_{V, min}^{t_k, \alpha} = 1,9534 \cdot 266,2 + 0,0312 \cdot 304,5$$

$$\underline{I_{V, min}^{t_k, \alpha} = 529,4995 \text{ kJ/kg}}$$

$$I_S^{t_k, \alpha} = 861,3912 + (1,6 - 1) \cdot 529,4995$$

$$\underline{I_S^{t_k, \alpha} = 1179,091 \text{ kJ/kg}}$$

$$\underline{t_{ok} = 25^\circ\text{C}}$$

$$I_{S,min}^{t_{ok}, \alpha} = 0,3723 \cdot 41,62 + 1,5254 \cdot 32,53 + 2,69 \cdot 10^{-5} \cdot 46,81 + 0,018 \cdot 23,32 \\ + 1,0782 \cdot 39,1 + 0,0064 \cdot 0,15 \cdot 20,2$$

$$\underline{I_{S,min}^{t_{ok}, \alpha} = 107,7153 \text{ kJ/kg}}$$

$$I_{V,min}^{t_{ok}, \alpha} = 1,9534 \cdot 32,57 + 0,0312 \cdot 39,1$$

$$\underline{I_{V,min}^{t_{ok}, \alpha} = 64,8428 \text{ kJ/kg}}$$

$$I_S^{t_{ok}, \alpha} = 107,7153 + (1,6 - 1) \cdot 64,8428$$

$$\underline{I_S^{t_{ok}, \alpha} = 146,621 \text{ kJ/kg}}$$

W^r	60	50	40	30	20	10	%
$I_{Smin}^{t_k}$	861,3912	982,3626	1103,334	1224,305	1345,277	1466,248	kJ/kg
$I_{Vmin}^{t_k}$	529,4995	661,8744	794,2493	926,6241	1058,999	1191,374	
$I_S^{t_k}$	1179,091	1379,487	1579,883	1780,28	1980,676	2181,072	
$I_{Smin}^{t_{ok}}$	107,7153	122,5256	137,3358	152,146	166,9562	181,7664	
$I_{Vmin}^{t_{ok}}$	64,84275	81,05344	97,26412	113,4748	129,6855	145,8962	
$I_S^{t_{ok}}$	146,621	171,1576	195,6943	220,2309	244,7675	269,3041	

Tabulka 4-9: Entalpie spalín

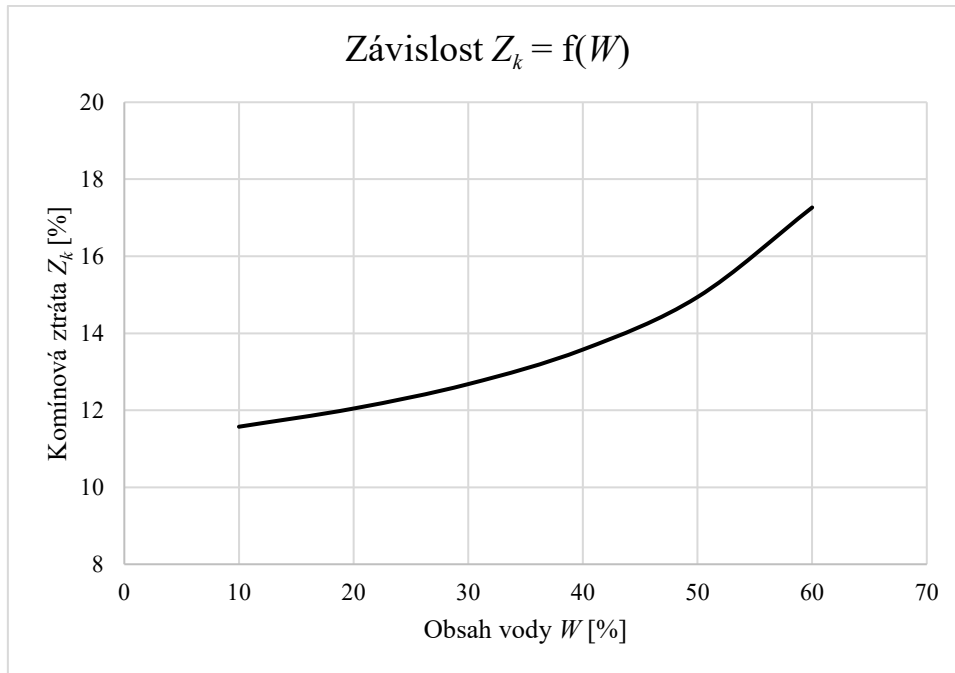
$$Z_k = (1 - Z_C) \cdot \frac{I_S^{t_k, \alpha} - I_S^{t_{ok}, \alpha}}{Q_i^r}$$

$$Z_k = (1 - 7,368 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{1709,091 - 146,621}{5935,501}$$

$$\underline{Z_k = 0,1727}$$

W^r [%]	60	50	40	30	20	10
Z_k [-]	0,172667	0,149404	0,135761	0,126793	0,120449	0,115724

Tabulka 4-10: Kominová ztráta pro různé hodnoty vlhkosti paliva



Graf 4-3: Závislost kominové ztráty na vlhkosti paliva

4.4.7 Výpočet účinnosti

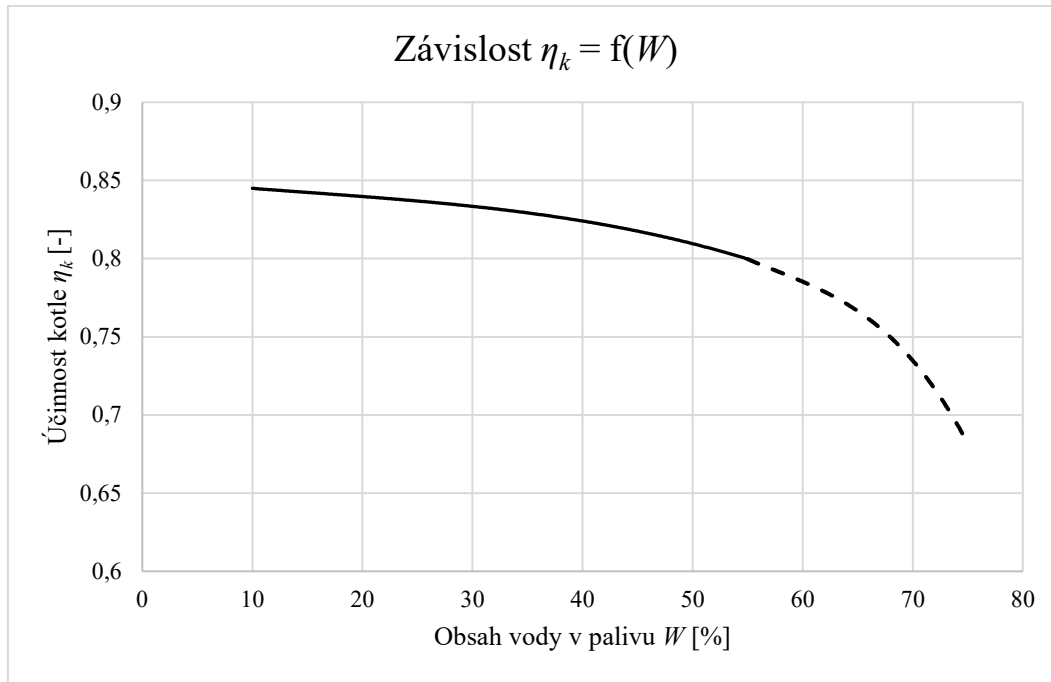
$$\eta = 1 - \Sigma Z_i = 1 - Z_k - Z_c - Z_{CO} - Z_f - Z_{sv}$$

$$\eta = 1 - 0,1727 - 7,368 \cdot 10^{-3} - 3,617 \cdot 10^{-3} - 6,97 \cdot 10^{-4} - 0,03$$

$$\eta = 0,7857$$

W^r [%]	60	50	40	30	20	10
η_k [-]	0,785651	0,809806	0,823971	0,833283	0,83987	0,844776

Tabulka 4-11: Účinnost kotle pro různé hodnoty vlhkosti paliva

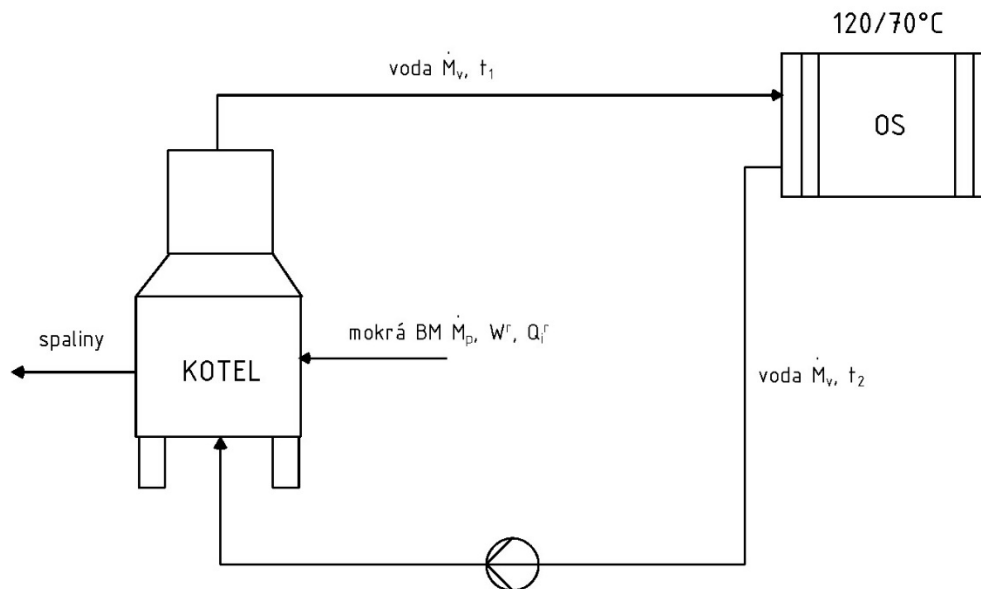


Graf 4-4: Závislost účinnosti kotle na vlhkosti paliva

Oblast v Grafu 4-4 vyznačená čárkovaně je pouze teoretická, poněvadž vlhkost 55% se obecně považuje za hranici spalitelnosti. Je také zjevné, že od této hranice se účinnost kotle výrazně snižuje.

4.5 Systém bez sušení biomasy

Energetický systém bez sušení biomasy se skládá pouze z horkovodního kotle pro spalování biomasy, čerpadla a spotřebiče horké vody, resp. otopné soustavy 120/70°C. V kotli je spalována biomasa s obsahem vody 60%, kterou máme přímo k dispozici.



Obrázek 4-1: Schéma systému bez sušení biomasy

4.5.1 Spotřeba paliva

$$\dot{M}_{pal} = \frac{\dot{Q}_{vyr}}{\eta_k \cdot Q_i^r} \quad (4.5-1)$$

$$\dot{M}_{pal} = \frac{1000}{0,7857 \cdot 5935,501}$$

$$\dot{M}_{pal} = \underline{0,214 \text{ kg/s}}$$

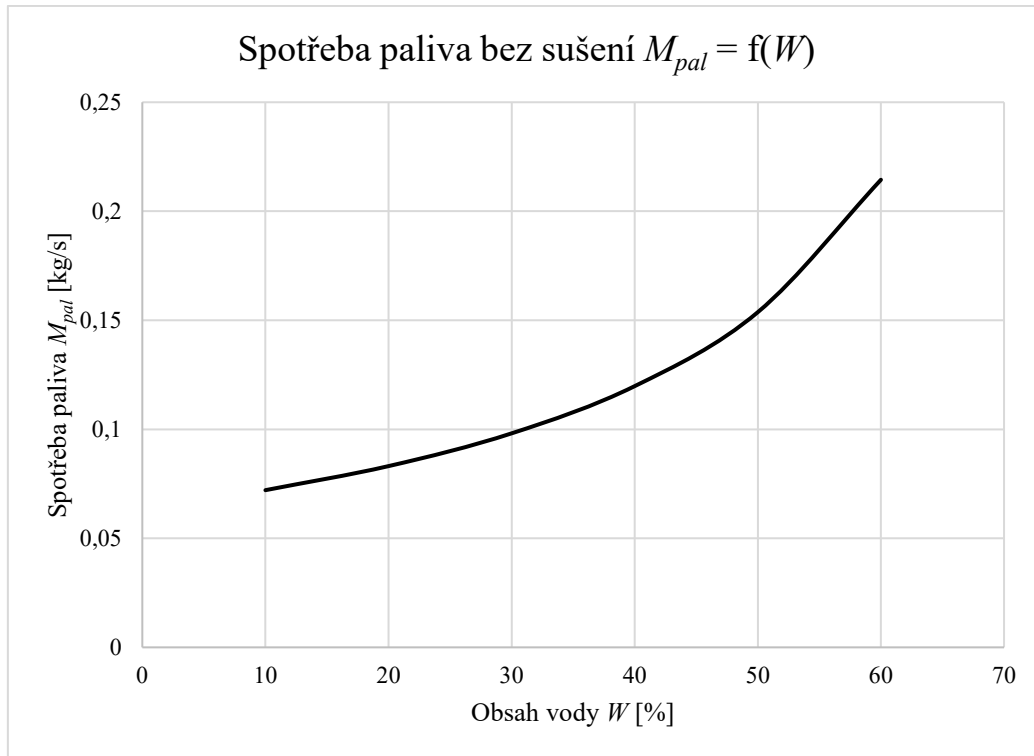
Tato hodnota nám udává spotřebu biomasy pro ohřátí vody o 50°C při daném výkonu a tedy i daném průtoku vody v kg/s.

4.5.1.1 Průtok vody

Výrobní teplo je teplo, které spaliny v kotli předají vodě. Pokud neuvažujeme ztráty v potrubní soustavě, je toto teplo rovno výkonu otopné soustavy.

$$\dot{Q}_{vyr} = \dot{M}_v \cdot c_v \cdot \Delta t \quad (4.5-2)$$

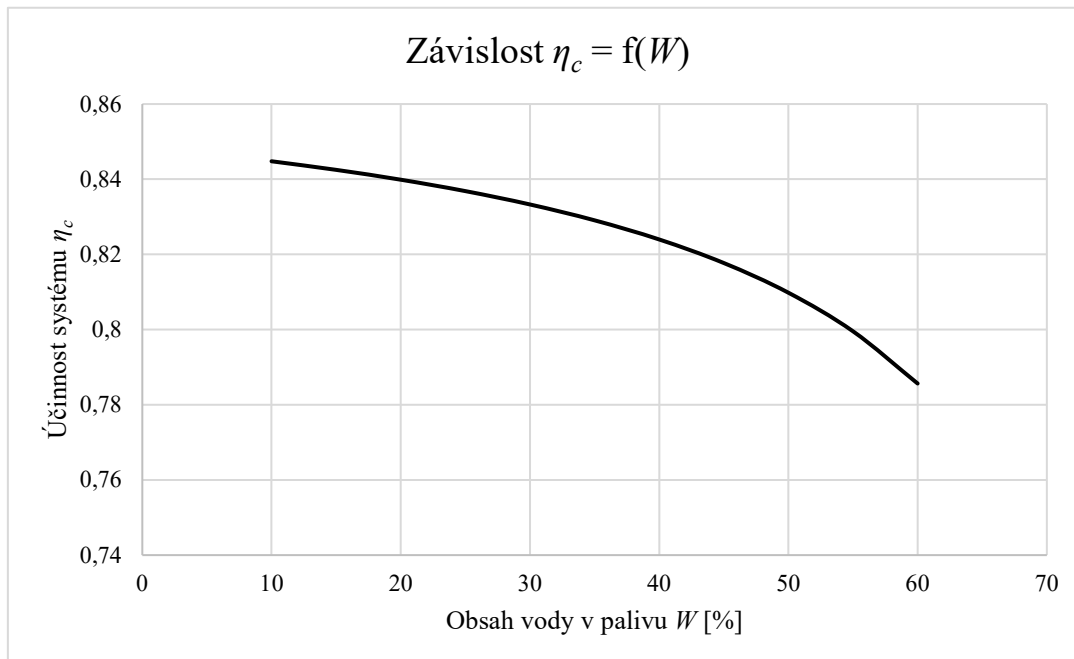
$$\dot{M}_v = \frac{\dot{Q}_{vyr}}{c_v \cdot \Delta t} = \frac{1000}{4,187 \cdot (120 - 70)} = \underline{4,777 \text{ kg/s}}$$



Graf 4-5: Spotřeba paliva pro systém bez sušení biomasy

4.5.2 Celková účinnost systému

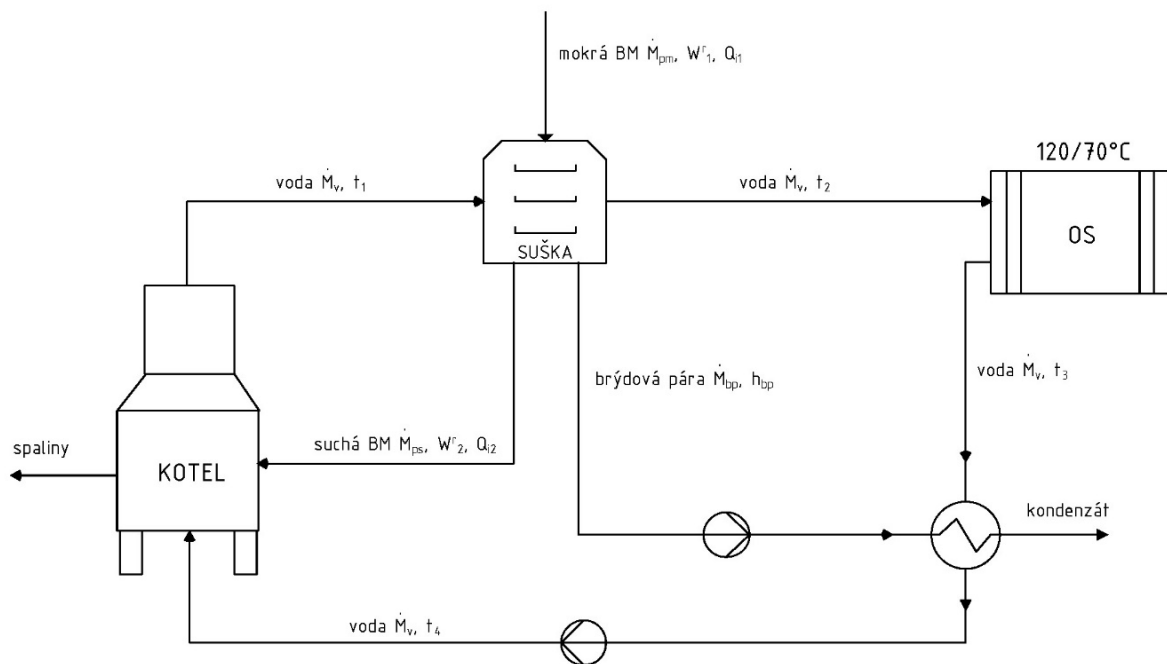
Nebudeme-li uvažovat ztráty potrubní soustavy a účinnost čerpadla, popř. přirozený oběh vody, je celková účinnost energetického systému v případě systému bez sušení identická s účinností kotle.



Graf 4-6: Závislost celkové účinnosti systému na obsahu vody v palivu

4.6 Systém se sušením biomasy

Po stránce kotle a otopné soustavy je systém totožný s předchozím případem. Rozdílem je zařazení kontaktní sušky a ohříváku vratné vody (zpátečky). Kotel ohřívá vodu na teplotu vyšší, než je třeba pro otopnou soustavu. Horká voda před vstupem do otopné soustavy prochází suškou, kde je nadbytečné teplo využito k vysušení paliva na vlhkost 10%. Zároveň je brýdová pára ze sušky následně využita ve výměníku tepla k přehřátí vratné vody z otopné soustavy.



Obrázek 4-2: Schéma systému se sušením biomasy

4.6.1 Spotřeba paliva

V tomto případě není určení paliva tak jednoznačné, můžeme si spotřebu paliva určit přibližně, ale reálně bude mírně vyšší vlivem vyššího ohřátí vody v kotli. Zásadní je určit výrobní teplo, které je v základu pořád 1 MW, ale je zvýšeno právě vyšším ohřátím vody v kotli a zároveň sníženo úsporou tepla ve výměníku.

$$\dot{M}_{pal} = \frac{\dot{Q}_{vyr}}{\eta_k \cdot Q_i^{10\%}}$$

$$\dot{M}_{pal} = \frac{1000}{0,8448 \cdot 16421,13}$$

$$\dot{M}_{pal} = 0,0721 \text{ kg/s (vysušeného paliva } W=10\%)$$

Problémem je, že celý výpočet je iterativní a je nutné si nejprve zvolit teploty vody vstupující a vystupující z kotle. Teplotu vody vstupující do kotle můžeme uvažovat 70°C a

teplotu z kotle vystupující např. 140°C. Výkon otopné soustavy zůstává stejný, a proto zůstává stejný i průtok vody, který musí zůstat konstantní a mění se pouze teploty.

$$t_{v1} = 140^{\circ}\text{C}$$

$$t_{v4} = 70^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{M}_v = \frac{\dot{Q}_{vyr}}{c_v \cdot \Delta t}$$

$$\dot{M}_v = \frac{1000}{4,187 \cdot (120 - 70)}$$

$$\underline{\dot{M}_v = 4,777 \text{ kg/s}}$$

4.6.2 Sušení

4.6.2.1 Poměrné vysušení

Pro přiblížení postupu výpočtu provádíme výpočet pro případ vysušení biomasy z vlhkosti 60% na 10%.

$$\Delta W = \frac{W_1 - W_2}{1 - W_2} \quad (4.6-1)$$

$$\Delta W = \frac{0,6 - 0,1}{1 - 0,1}$$

$$\underline{\Delta W = 0,555}$$

4.6.2.2 Teplo potřebné k vysušení

Ve vztahu (4.6-2) se vyskytuje několik nových veličin. Pro náš případ budeme uvažovat následující hodnoty:

$$\eta_{suš} = 0,98 \quad \dots \text{ účinnost sušárny paliva}$$

$$l_v = 2257 \text{ kJ/kg} \quad \dots \text{ měrné výparné teplo vody}$$

$$c_{BM} = 1,4 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \quad \dots \text{ měrná tepelná kapacita biomasy}$$

Teplotu okolí budeme uvažovat stejnou jako v kapitole 4.4 – $t_{ok} = 25^{\circ}\text{C}$. Předpokládáme, že nebude docházet k přehřívání paliva ani páry a ta bude ze sušárny odcházet sytá o teplotě 100°C.

$$q = \frac{1}{\eta_{suš}} \cdot [\Delta W \cdot (c_v \cdot (100 - t_{ok}) + l_v) + (1 - W_0) \cdot c_{BM} \cdot (100 - t_{ok})] \quad (4.6-2)$$

$$q = \frac{1}{0,98} \cdot [0,555 \cdot (4,187 \cdot (100 - 25) + 2257) + (1 - 0,6) \cdot 1,4 \cdot (100 - 25)]$$

$$\underline{q = 1500,35 \text{ kJ/kg}}$$

Tato hodnota nám udává, kolik tepla je potřeba k vysušení jednoho kilogramu paliva z vlhkosti 60% na 10%.

4.6.2.3 Entalpie (teplota) vody vstupující do sušárny

Nyní je stěžejní určit teplotu, resp. entalpii, na kterou je nutné vodu v kotli ohřát, aby v sušárně vysušila paliva na danou hodnotu a ze sušárny vystupovala o teplotě 120°C. Protože měrná tepelná kapacita vody je mírně závislá na teplotě, je přesnější provádět výpočty přes entalpie s pomoci tabulek vody a vodní páry.

Budeme vycházet ze dvou různých vztahů pro výpočet toku vysušeného paliva. První je množství paliva, které jsem schopen vysušit s vodou o průtoku \dot{M}_v a teplotním spádem $(t_1 - 120) K$. A druhý je množství paliva, které potřebuji na ohřátí vody o průtoku \dot{M}_v z teploty t_{v4} na teplotu t_{v1} .

$$\dot{M}_{pal}^1 = \frac{\dot{M}_v \cdot c_v \cdot (t_{v1} - 120)}{q} \cdot (1 - \Delta W) = \frac{\dot{M}_v \cdot (h_{v1} - h_{v2})}{q} \cdot (1 - \Delta W) \quad (4.6-3)$$

$$\dot{M}_{pal}^2 = \frac{\dot{M}_v \cdot c_v \cdot (t_{v1} - t_{v4})}{Q_i^{10\%} \cdot \eta_k} = \frac{\dot{M}_v \cdot (h_{v1} - h_{v4})}{Q_i^{10\%} \cdot \eta_k} \quad (4.6-4)$$

Abychom určili teplotu t_{v1} , která nám zajistí, že se palivo vysuší na správnou vlhkost při daném průtoku a jeho teplota na výstupu ze sušky bude 120°C, musíme dát do rovnosti rovnice (4.6-3) a (4.6-4). Tím dostaneme vztah (4.6-6) pro výpočet entalpie vody na výstupu z kotle, ze které snadno zjistíme teplotu. Uvažujeme výše zvolenou teplotu $t_{v4} = 70^\circ C$, které odpovídá entalpie $h_{v4} = 293,32 kJ/kg$. Teplotě $t_{v2} = 120^\circ C$ odpovídá entalpie $h_{v2} = 503,93 kJ/kg$.

$$h_{v1} = \frac{Q_i \cdot \eta_k \cdot (1 - \Delta W) \cdot h_{v2} - q \cdot h_{v4}}{Q_i \cdot \eta_k \cdot (1 - \Delta W) - q} \quad (4.6-5)$$

$$h_{v1} = \frac{16421,13 \cdot 0,8448 \cdot 0,444 \cdot 503,93 - 1500,35 \cdot 293,32}{16421,13 \cdot 0,8448 \cdot 0,444 - 1500,35}$$

$$\underline{h_{v1} = 571,75 kJ/kg}$$

$$\underline{t_{v1} = 135,94^\circ C}$$

4.6.3 Ohřívák vratné vody

4.6.3.1 Tok brýdové páry

Kromě vysušeného paliva v sušce vzniká brýdová pára, která je následně využita k ohřevu zpátečky z otopné soustavy. Její tok je určen vztahem (4.6-7) a při průtoku \dot{M}_v a právě vypočtené entalpii h_{v1} je roven:

$$\dot{M}_{bp} = \dot{M}_{pal}^1 \cdot \frac{\Delta W}{(1 - \Delta W)} = \frac{\Delta W}{q} \cdot \dot{M}_v \cdot (h_{v1} - h_{v2}) \quad (4.6-6)$$

$$\dot{M}_{bp} = \frac{0,555}{1500,35} \cdot 4,777 \cdot (571,75 - 503,93)$$

$$\underline{\dot{M}_{bp} = 0,12 \text{ kg/s}}$$

M_{pal}^1 podle vztahu (4.3-6) určuje množství paliva, které jsem schopen vysušit s vodou o průtoku \dot{M}_v a teplotním spádem ($t_1 - 120$) K. Toto množství je již v suchém stavu, což je dáno členem $(1 - \Delta W)$. Pro zjištění množství brýdové páry uvolněné při sušení mokré biomasy by mi stačilo použít vztahu $\dot{M}_{bp} = \dot{M}_{pal} \cdot \Delta W$, kde by \dot{M}_{pal} bylo množství paliva v mokřém stavu. Jeho hodnotu však nikde v průběhu nepočítám, proto je vztah pro výpočet toku brýdové páry takový, jak je uveden.

Při výpočtu tepla potřebného k vysušení (kap. 4.6.2.2) nebylo uvažováno žádné přehřátí páry. Jedná se tedy o sytou páru, jejíž teplota za normálních podmínek je 100°C.

Brýdová pára při atmosférickém sušení paliva opouští sušku o teplotě blízké 100°C, obsahuje však vzduch, který je při sušení do sušky přisáván. Tento vzduch značně mění chování páry, snižuje teplotu sytosti a zhoršuje přestup tepla. [7]

4.6.3.2 Teploty sytosti páry

Při kondenzaci páry ve směsi s inertními plyny dochází ke změně koncentrace vodní páry a tím i změně parciálního tlaku vodní páry. Je nutné tedy dopočítat teplotu sytosti vodní páry na začátku a na konci kondenzace.

Uvažujme, že množství přisátého vzduchu do brýdové páry je 5% z celkového množství páry. Množství vodní páry i množství vzduchu jsme schopni zjistit. Dále určíme molární hmotnost vody a vzduchu.

$$m_{H_2O}^1 = 0,12 \text{ kg/s}$$

$$m_{vzd} = 0,05 \cdot 0,12 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$M_{m,H_2O} = 18,015 \text{ g/mol}$$

$$M_{m,vzd} = 28,96 \text{ g/mol}$$

Poté podle následujícího vztahu zjistíme parciální tlak páry a z něj podle tabulek vodní páry nakonec i teplotu sytosti. Pro atmosférický tlak uvažuji hodnotu normálního atmosférického tlaku $p_{atm} = 101,325 \text{ kPa}$.

$$p_{\text{parc}}^{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{m,\text{H}_2\text{O}}}}{\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{m,\text{H}_2\text{O}}} + \frac{m_{\text{vzd}}}{M_{m,\text{vzd}}}} \cdot p_{\text{atm}} \quad (4.6-7)$$

$$p_{\text{parc}}^{\text{H}_2\text{O}} = 98,269 \text{ kPa}$$

$$T_{\text{sat}} = T_{\text{sat}}(p_{\text{parc}}) \quad (4.6-8)$$

$$\underline{T_{\text{sat}} = 99,12^\circ\text{C}}$$

Stejný postup provedeme ještě jednou pro stav na konci kondenzace, kde část páry zkondenzovala a část páry zůstala v plynném stavu. Toto množství udává hodnota výtěžnosti brýdové páry ε . Její hodnota byla pro první přiblížení stanovena na $\varepsilon = 0,7$ podle zdroje [7]. Následně po provedení návrhu kondenzátoru v kapitole 7 podle počtu trubek a teploty chladicí vody byla opět podle [7] hodnota upřesněna na $\varepsilon = 0,721$.

Na konci výměníku tepla tedy 72,1% páry zkondenzovalo, čímž došlo ke snížení parciálního tlaku a opět i snížení teploty sytosti. Množství páry je tedy následovné:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^2 = (1 - \varepsilon) \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}^1 = 0,0335 \text{ kg}$$

Množství vzduchu zůstává stejné, stejně jako molární hmotnosti; parciální tlak a teplota sytosti jsou rovny:

$$p_{\text{parc}}^{\text{H}_2\text{O}} = 91,168 \text{ kPa}$$

$$\underline{T_{\text{sat}} = 97,04^\circ\text{C}}$$

Tyto teploty sytosti nyní použijeme jako vstupní a výstupní teplotu páry do bilance ohříváku pro zjištění výstupní teploty vody.

4.6.3.3 *Bilance výměníku (ohříváku)*

Z bilance výměníku tepla (vztah (4.6-8)) snadno určíme vztah (4.6-9) pro výpočet teploty vody vystupující z výměníku t_{v4} . Součinitel ε ve vztahu (4.6-8) charakterizuje výtěžnost brýdové páry, uvažujeme hodnotu $\varepsilon = 0,721$. [7] Účinnost výměníku uvažujeme $\eta_{VT} = 0,99$.

Entalpie vstupující vodní páry o stanovené teplotě sytosti $t_{bp1} = 99,12^\circ\text{C}$ je $h_{bp1} = 2674,18 \text{ kJ/kg}$ a výstupní páry, resp. té části, která zkondenzovala při teplotě $t_{bp2} = 97,04^\circ\text{C}$, je $h_{bp2} = 406,72 \text{ kJ/kg}$.

$$\varepsilon \cdot \eta_{VT} \cdot \dot{M}_{bp} \cdot (h_{bp1} - h_{bp2}) = \dot{M}_v \cdot (h_{v4} - h_{v3}) \quad (4.6-9)$$

$$h_{v4} = \varepsilon \cdot \eta_{VT} \cdot \frac{\dot{M}_{bp} \cdot (h_{bp1} - h_{bp2})}{\dot{M}_v} + h_{v3} \quad (4.6-10)$$

$$h_{v4} = 0,721 \cdot 0,99 \cdot \frac{0,12 \cdot (2674,18 - 406,62)}{4,777} + 293,32$$

$$\underline{h_{v4} = 333,98 \text{ kJ/kg}}$$

$$\underline{t_{v4} = 79,76^\circ\text{C}}$$

4.6.4 Výsledné hodnoty po iteraci

Po první iteraci jsme získali teploty $t_1 = 135,94^\circ\text{C}$ a $t_4 = 79,76^\circ\text{C}$. Zopakujeme-li několikrát postup z kapitoly 4.6.2 a 4.6.3 dostaneme následující hodnoty:

$$h_{v1} = 560,71 \text{ kJ/kg}; t_{v1} = 133,35^\circ\text{C}$$

$$h_{v4} = 327,35 \text{ kJ/kg}; t_{v4} = 78,12^\circ\text{C}$$

$$\dot{M}_{pal} = 0,08 \text{ kg/s}$$

$$\dot{M}_{bp} = 0,1 \text{ kg/s}$$

Protože se změní i množství brýdové páry, změní se nepatrně i hodnoty teplot sytosti parovzdušné směsi, které uvažujeme jako vstupní a výstupní teploty do kondenzátoru. Změna jsou pouze v řádu tisícín stupně Celsia, proto ji neuvádím.

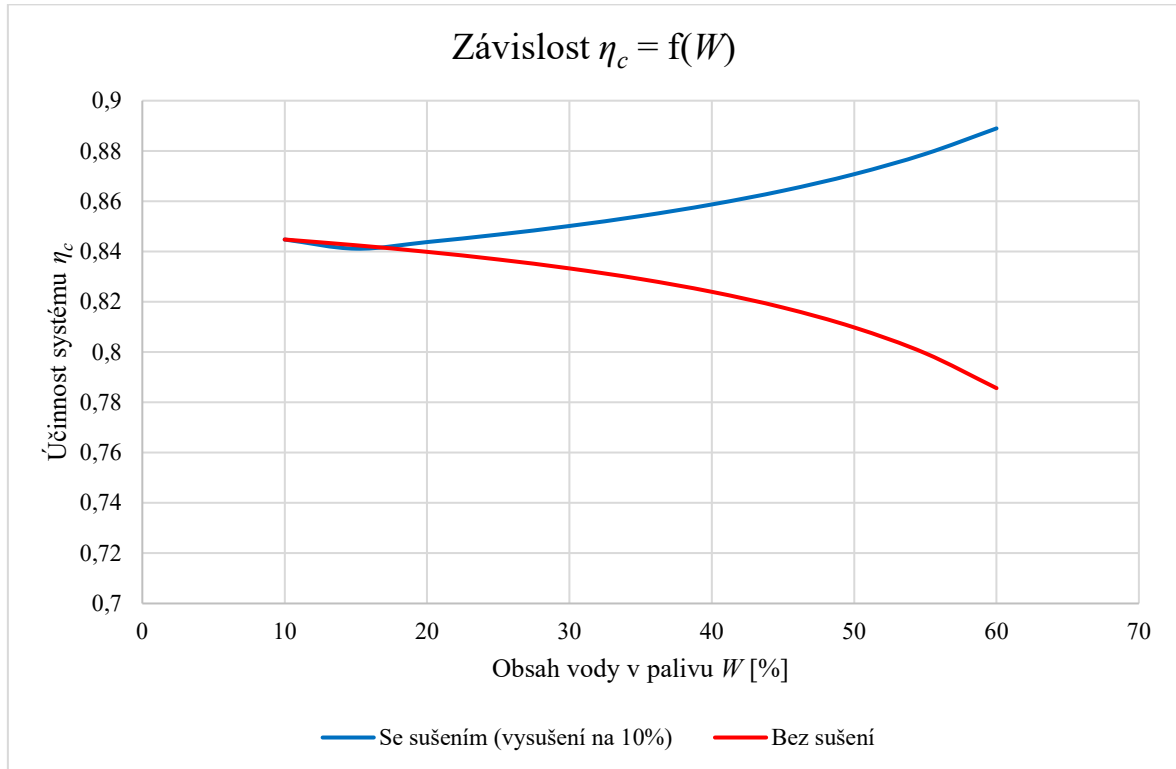
4.6.5 Celková účinnost systému

Celková účinnost u systému se sušením biomasy je na jednu stranu nepříznivě ovlivněna účinností sušky a tepelného výměníku, avšak na druhou stranu je to právě výměník, který celkovou účinnost systému zvyšuje. Navýšení účinnost spočívá v tom, že podstatná část tepla, jež byla v první fázi dodána palivu, odchází v brýdové páře a je v další fázi znovu využita (regenerována) v ohříváku zpátečky.

$$\eta_c^{suš} = \frac{\dot{Q}_{vyr} + \dot{M}_v \cdot c_v \cdot (h_{v4} - h_{v3})}{\dot{M}_{pal} \cdot Q_i} \quad (4.6-11)$$

Provedeme-li celý výpočet z kapitoly 4.6 pro různé vlhkosti dodávaného paliva, dostaneme následující závislost. Z ní je zjevné, že účinnost celého systému se sušením se při konstantní koncové vlhkosti (v našem případě 10%) zvyšuje přímo úměrně s vlhkostí dodávaného paliva. Výjimkou je pouze krátká oblast od 10% do 15%, zde vlivem uvažovaných účinností jednotlivých komponent došlo ke snížení účinnosti. Není překvapením, že v této oblasti by integrace sušení neměla žádný význam.

Jako v předchozím případě není uvažována účinnost čerpadla a ztráty potrubní sítě, které by v tomto případě byly ještě vyšší.



Graf 4-7: Srovnání celkových účinností obou systémů

Při vstupním palivu o vlhkosti 60% činí nárůst celkové účinnosti systému se sušením (při vysušení paliva na vlhkost 10%) oproti systému bez sušení deset procentních bodů, což je relativní nárůst o 13,2%.

5 Experimentální měření na sušárně biomasy

Následující kapitola popisuje měření na sušárně biomasy v halových laboratořích ústavu energetiky na Julisce. Obsahuje postup, jak měření probíhalo, a jeho vyhodnocení.

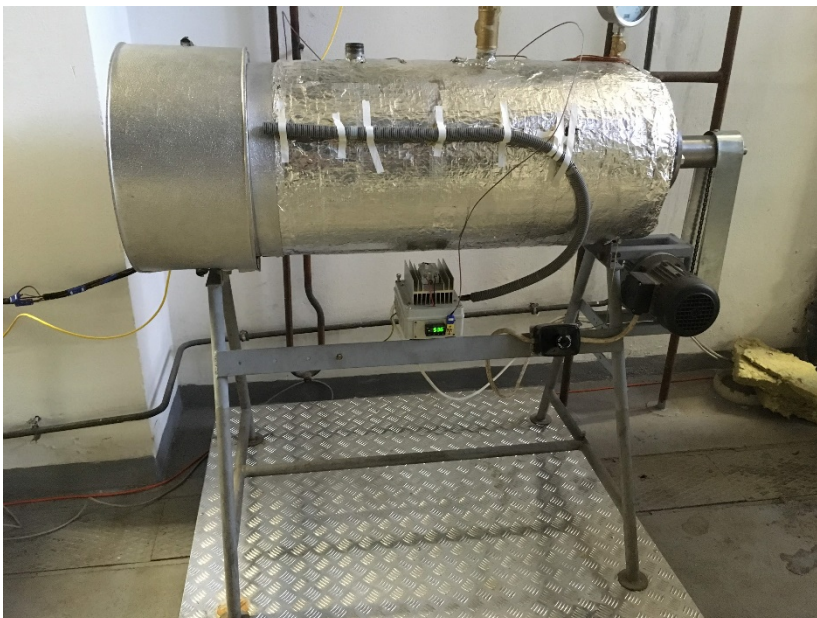
5.1 Popis měření

Účelem experimentu bylo provést několik měření se sušením biomasy pro různé parametry. Ze získaných údajů lze pak získat hodnoty pro návrh sušárny do *kapitoly 6*.

Sušárna, na které měření probíhalo, je bubnová otápená odporově elektrickým proudem a je vybavena míchadlem, jež je poháněné elektromotorem. V sušárně jsou na několika místech integrovány termočlánky, jež nám skrze připojenou měřicí stanici umožňují zaznamenávat a odečítat teploty v sušárně v různém čase. K měřicí stanici je zároveň připojen i výstup z tenzometrické váhy, na které je sušárna postavena, díky čemuž můžeme odečítat i průběh hmotnosti v čase. Parametry sušárny jsou následující:

Průměr bubnu	0,26 m
Délka bubnu	1 m
Vnitřní povrch bubnu	0,817 m ²
Vnitřní objem bubnu	53,1 l

Tabulka 5-1: Parametry sušky



Obrázek 5-1: Bubnová sušárna, laboratoře Juliska

Sušeným materiálem byla mulčovací kůra, jež byla nadrcena ve štěpkovači, navlhčena a ponechána na volném prostranství tak, jak by tomu v reálném případě pravděpodobně bylo.



Obrázek 5-2: Sušený materiál



Obrázek 5-3: Sušený materiál

5.2 Postup měření

5.2.1 Určení vstupní vlhkosti

V první řadě je třeba určit hodnotu vstupní vlhkosti sušeného materiálu. Nejprve tedy zapneme elektrickou sušárnu (Obrázek 5-4) a necháme ji nahřát. Mezitím si odvážíme několik vzorků materiálu, resp. kůry; zvážíme vždy prázdnou misku a následně misku i se vzorkem, rozdíl je hmotnost vzorku. Vzorky by měly reprezentovat celou várku materiálu, ideální je použít tzv. metodu čtvrcení. Minimální počet vzorků jsou dva, v našem případě byly čtyři. Po zahřátí elektrické sušárny vložíme misky se vzorky dovnitř a zde je zanecháme minimálně jednu hodinu při teplotě minimálně 110°C.

Po uplynutí alespoň jedné hodiny vyjmeme misky se vzorky ze sušárny a před zvážením je necháme vychladnout, v ideálním případě tak děláme v tzv. exsikátoru², aby nedošlo ke zpětnému navázání vzdušné vlhkosti. Po opětovném zvážení tedy máme tři hodnoty

² Tlustostěnná vzduchotěsná nádoba, jež je plněná hygroskopickou látkou a tím zbavena veškeré vlhkosti

hmotností pro každý vzorek a pomocí vzorce (5.2-1) můžeme zjistit hodnotu vlhkosti. Výsledná hodnota vlhkosti materiálu se určí jako průměr vlhkostí všech (čtyř) navážek.

$$W = \frac{m_{mis+vz}^0 - m_{mis+vz}^1}{m_{mis+vz}^0 - m_{mis}^0} = \frac{m_{vz}^0 - m_{vz}^1}{m_{vz}^0} \quad (5.2-1)$$



Obrázek 5-4: Elektrická sušárna



Obrázek 5-5: Misky se vzorky sušeného materiálu

5.2.2 Sušení materiálu v bubnové sušárně

V době, kdy se vzorky suší v elektrické sušárně, můžeme přikročit k hlavnímu měření na bubnové sušárně. Jako v předchozím případě je nutné nejprve nechat sušku dosáhnout požadované teploty otopu. V této době si připravíme materiál, kterým budeme sušárnu plnit. K tomuto účelu poslouží kbelík, který byl předem opatřen ryskami, jež značí objem vloženého materiálu.

Po nahlátní sušárny na požadovanou teplotu se sejme víko a vyjme míchadlo, sušárna se naplní materiálem a míchadlo a víko se vrátí na své místo. Celý proces plnění by měl být proveden co možná nejrychleji, aby příliš neklesla teplota v sušárně a zároveň aby se v tomto čase odpařilo ze sušeného materiálu co nejméně vody. Po dokončení plnění je třeba odečíst hodnotu spotřebované energie na elektroměru a zahájit odpočet času. Odpočítává se každých pět minut a v každém časovém okamžiku se odečte hodnota hmotnosti. Jakmile zaznameneáme, že se hodnota hmotnosti v pětiminutových intervalech příliš nemění, lze předpokládat, že se většina vody již odpařila. Na konci měření se opět odečte z elektroměru hodnota spotřebované energie.



Obrázek 5-7: Elektroměr pro odečet spotřeby Obrázek 5-6: Měřicí stanice pro odečet hmotnosti energie

Měření proběhlo šestkrát, po každé za jiných parametrů. Při prvních třech měřeních bylo proměnným parametrem objemové zaplnění sušárny a při druhých třech teplota otopu.

Číslo měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Teplota otopu [°C]	130	130	130	115	130	145
Objemové zaplnění [%]	10	20	30	10	10	10

Tabulka 5-2: Parametry jednotlivých měření

Po skončení sušení a vyjmutí vsázky ze sušárny je třeba stanovit výstupní vlhkost materiálu. Toho dosáhneme stejným postupem jako v případě stanovení vstupní vlhkosti materiálu, jež je popsán výše v kapitole 5.2.1.

5.3 Vyhodnocení měření

V následující tabulce jsou zaznamenány vstupní a výstupní hodnoty jednotlivých měření. Určení hodnot vstupní a výstupní vlhkosti je popsáno v kapitole výše. Množství odpařené vody je pouze rozdíl hmotností vsázky na začátku a na konci měření.

Nejdůležitější pro popis sušáren obecně jsou poslední tři charakteristiky. Měrné odpařivosti jsou zároveň nezbytné pro návrh sušárny biomasy v následující kapitole. Měrná spotřeba energie má při návrhu informativní charakter, díky ní lze odhadnout energetickou spotřebu navrhované sušárny.

Číslo měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Hmotnost vsázky [kg]	2,020	3,946	5,590	2,008	2,012	1,982
Vstupní vlhkost [-]	0,536	0,536	0,536	0,505	0,505	0,505
Doba sušení [min]	45	60	60	50	35	30
Výstupní vlhkost [-]	0,075	0,028	0,031	0,057	0,071	0,038
Odpařená voda [kg]	0,994	2,040	2,834	0,896	0,924	0,930
Měrná plošná odpařivost [kg/h·m ²]	1,622	2,497	3,469	1,316	1,939	2,277
Měrná objemová odpařivost [kg/h·m ³]	24,959	38,418	53,371	20,249	29,831	35,028
Měrná spotřeba energie [kWh/kg]	1,358	1,083	0,780	0,971	1,223	1,290

Tabulka 5-3: Výstupní data

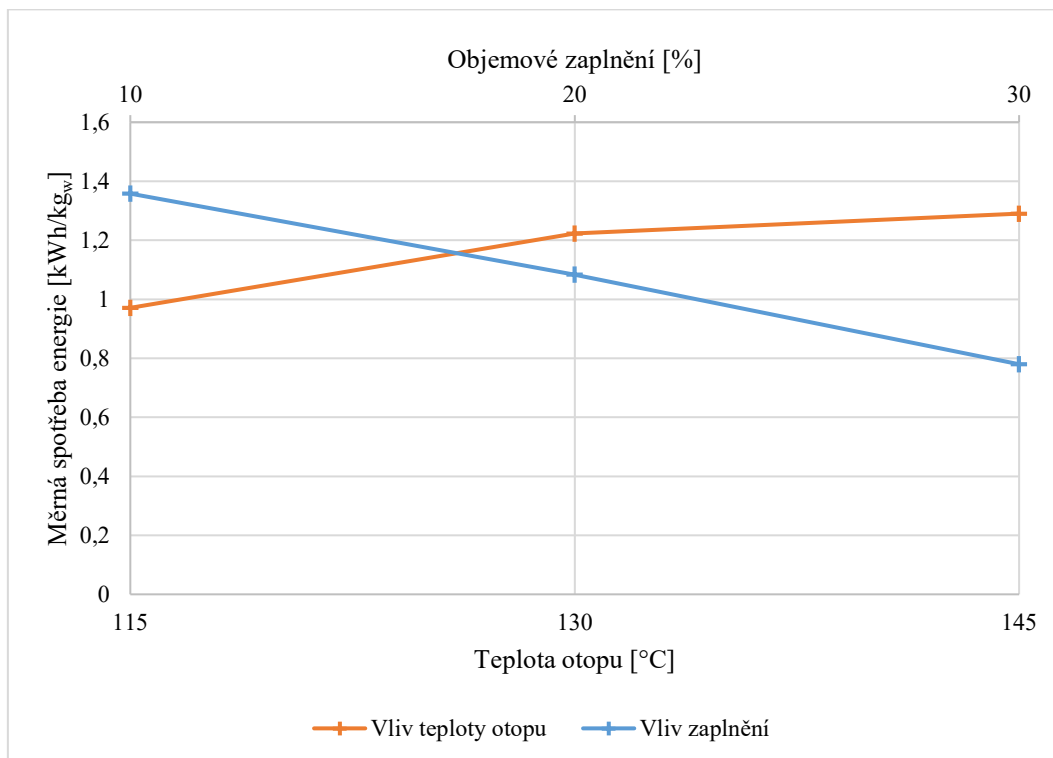
5.3.1 Měrná spotřeba energie

Měrná spotřeba energie je množství energie potřebné k odpaření jednoho kilogramu vody. Množství spotřebované elektrické energie jsme odečetli z elektroměru na začátku a na konci každého měření a množství odpařené vody je rozdíl hmotností vsázky na začátku a na konci měření.

$$e = \frac{E_t - E_0}{m_W} \quad (5.3-1)$$

Pro každý proměnný parametr jsme provedli tři měření pro různé hodnoty, proto bylo možné zanást do grafu alespoň přibližnou závislost měrné spotřeby energie na těchto

proměnných parametrech. Je patrné, že měrná spotřeba energie roste s rostoucí teplotou otopu; vliv objemového zaplnění sušárny je však opačný.



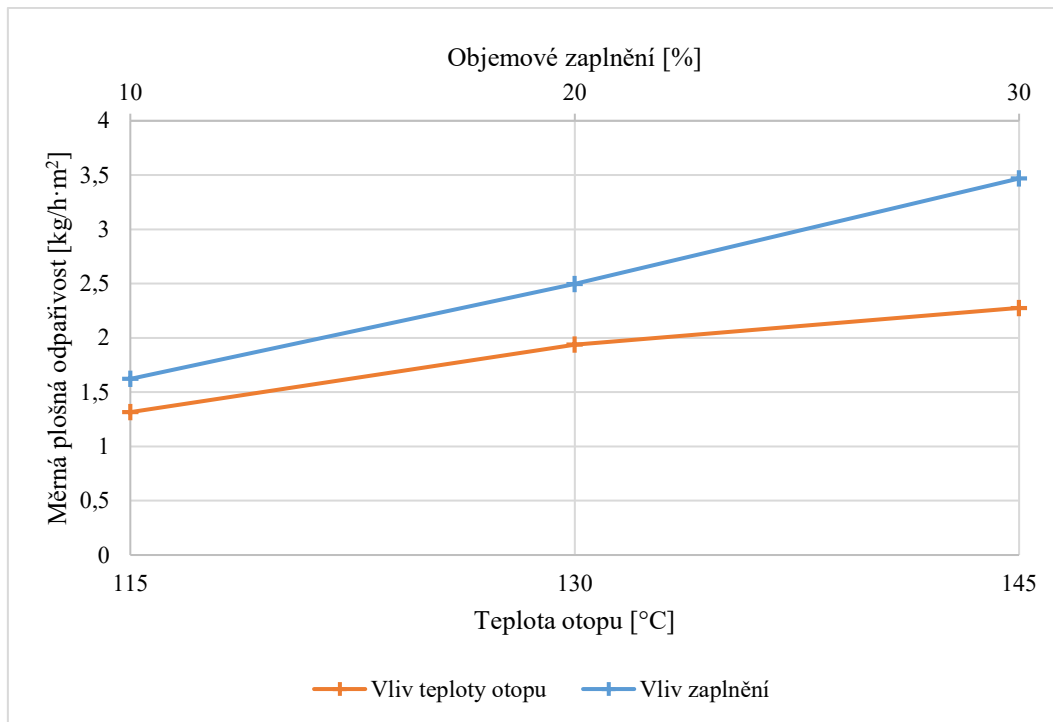
Graf 5-1: Závislost měrné spotřeby energie na teplotě otopu a objemovém zaplnění

5.3.2 Měrná plošná odpařivost

Měrná plošná odpařivost je množství odpařené vody za hodinu vztažené k ploše sušce. Vnitřní plocha bubnu sušárny je konstantní a známá hodnota, snadno zjistitelná z rozměrů bubnu sušárny a je uvedena v *Tabulce 5-1*. Množství odpařené vody i celkový čas sušení jsou uvedeny v *Tabulce 5-3*.

$$\mu_s = \frac{m_w}{S \cdot \tau} \quad [kg/h \cdot m^2] \quad (5.3-2)$$

Opět je možné zaznamenat do grafu vliv proměnných parametrů, resp. teploty otopu a objemového zaplnění, na měrnou plošnou odpařivost. Je patrné, že oba parametry s rostoucí hodnotou zvyšují i hodnotu měrné plošné odpařivosti. Nárůst je mírně výraznější pro zvyšující se objemové zaplnění, kdy právě při nejvyšším zaplnění 30% (měření č. 3) je tato hodnota nejvyšší.



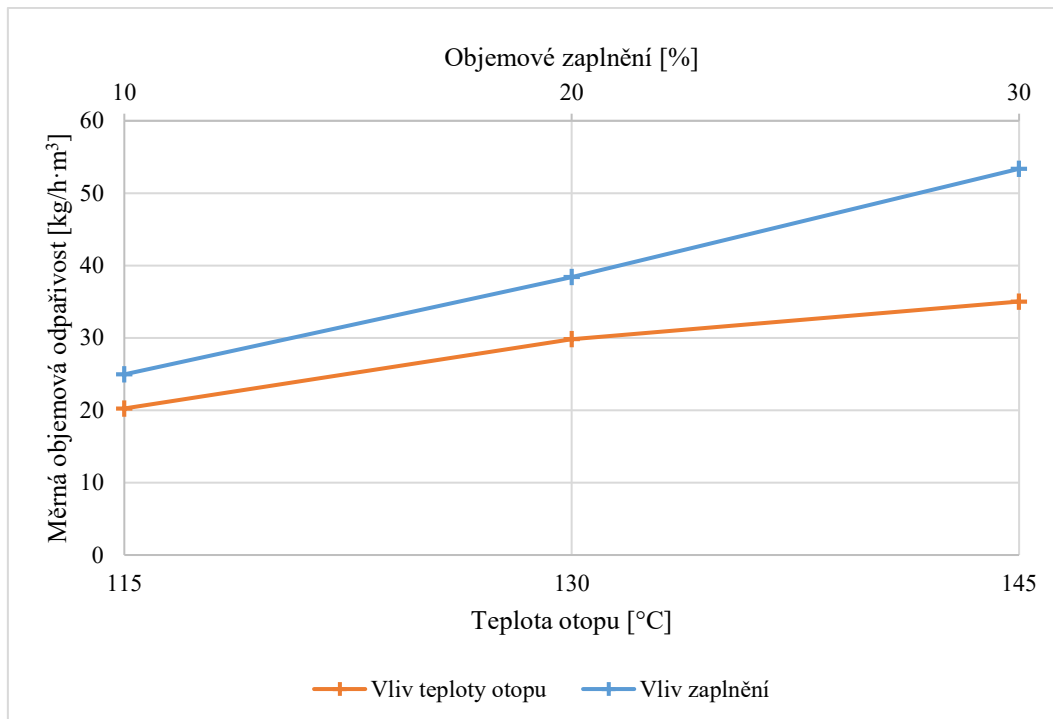
Graf 5-2: Závislost měrné plošné odpařivosti na teplotě otopu a objemovém zaplnění

5.3.3 Měrná objemová odpařivost

Kritérium měrné objemové odpařivosti je velmi podobné plošné odpařivosti, množství odpařené vody je pouze vztaženo na objem bubnu sušárny, která je opět známá a konstantní a je uvedena v *Tabulce 5-1*.

$$\mu_V = \frac{m_W}{V \cdot \tau} \text{ [kg/h} \cdot \text{m}^3\text{]} \quad (5.3-3)$$

Podobnost nekončí ani v závislostech hodnoty objemové odpařivosti na teplotě otopu a objemovém zaplnění. Stejně jako v předchozím případě je nejvyšší hodnota měrné objemové odpařivosti dosažena při nejvyšším zaplnění (měření č. 5).



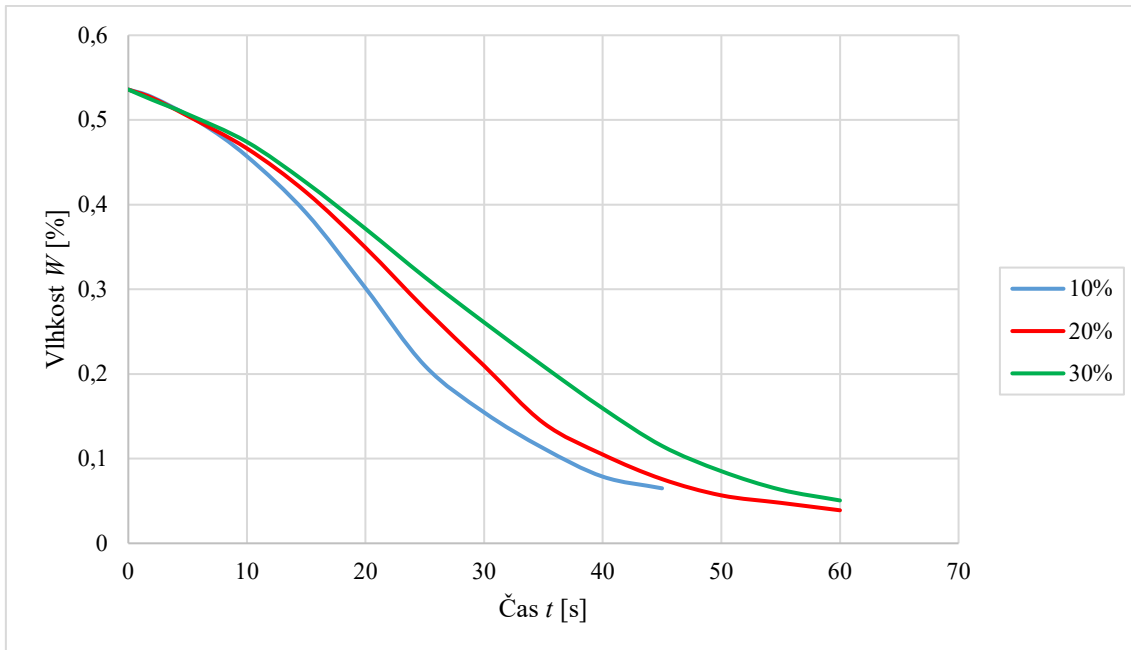
Graf 5-3: Závislost měrné objemové odpařivosti na teplotě otopu a objemovém zaplnění

5.3.4 Sušící křivky

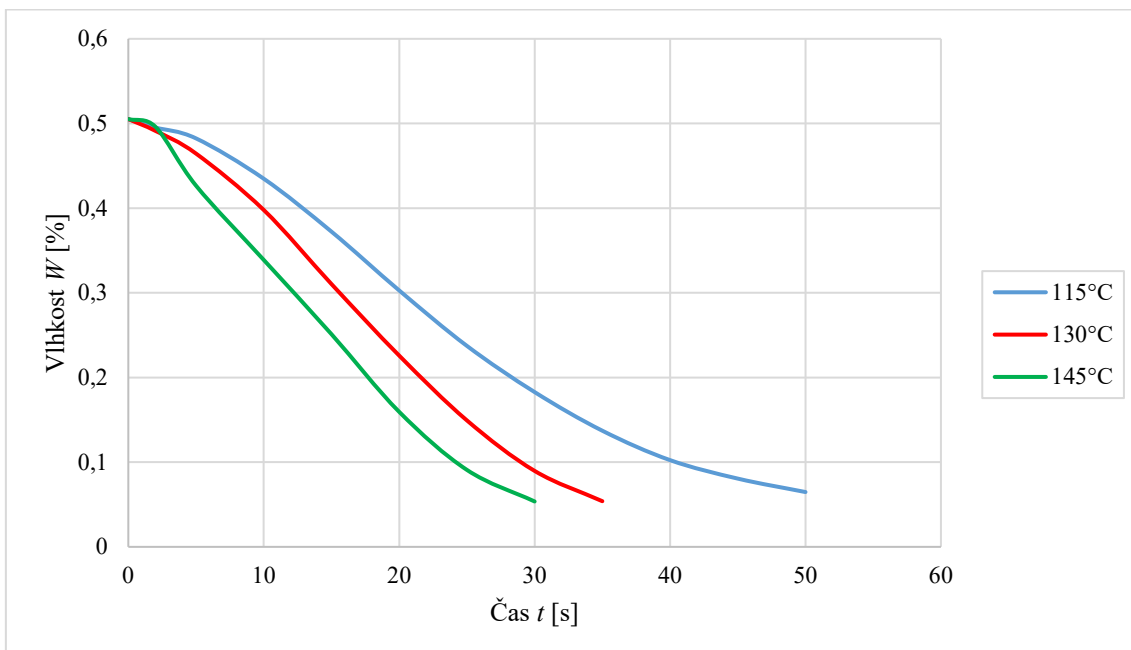
Sušící křivka představuje závislost poklesu vlhkosti vsázky na čase. Protože jsme při našem experimentálním měření zaznamenávali hmotnost každých pět minut, můžeme podle vztahu (5.3-4) z hodnoty vstupní hmotnosti vypočítat přibližnou hodnotu vlhkosti v jakémkoliv časovém okamžiku, pro který známe hmotnost vsázky.

$$W_t = \frac{m_0 \cdot W_0 - (m_0 - m_t)}{m_0} \quad (5.3-4)$$

Opět samozřejmě můžeme zaznamenat, jak se na sušící křivce promítne vliv teploty otopu a vliv objemového zaplnění. Logicky lze předpokládat, že čím vyšší bude teplota otopu, tím bude sušící křivka strmější a tím celkový proces sušení rychlejší. Podobně lze pozorovat, že menší objemové zaplnění sušárny vede ke strmější sušící křivce a kratší době sušení; v tomto případě není ovšem změna tak výrazná jako v případě teploty otopu.



Graf 5-4: Sušící křivky pro různé hodnoty objemového zaplnění



Graf 5-5: Sušící křivky pro různé teploty otopu

5.3.5 Shrnutí

Z výsledných dat a grafických výstupů jasně plyne, že nevyšších, a tedy nejvýhodnějších, hodnot měrných odpařivostí jsme dosáhli při měření č. 3 (objemové zaplnění 30%). Toto měření dopadlo nejlépe rovněž z hlediska měrné spotřeby energie. Jediné hledisko, kde zaostává, je rychlost sušení. Zde vychází nejlépe měření č. 6, kde byla použita nejvyšší teplota otopu. Nabízí se tedy, že pokud bychom chtěli zkrátit dobu sušení při vyšší hodnotě objemového zaplnění, stačilo by zvýšit teplotu otopu. To by však samozřejmě negativně ovlivnilo měrnou spotřebu energie.

6 Návrh sušárny biomasy

6.1 Volba dat pro návrh sušárny

Už ze shrnutí výsledků měření na experimentální sušce v předchozí kapitole lze předpokládat, že jako nejvýhodnější parametry pro návrh sušárny jsou parametry z měření č. 3. Tyto parametry nám zajistí, že výsledná sušárna bude mít nejmenší rozměry při největším množství odpařené vody a zároveň nízké energetické spotřebě.

Množství vody, které je třeba odpařit už známe z bilance v kapitole 4.6.3.1.

Číslo měření	3.
Teplota otopu [°C]	130
Objemové zaplnění [%]	30
Měrná plošná odpařivost [kg/h·m ²]	3,469
Měrná objemová odpařivost [kg/h·m ³]	53,371
Měrná spotřeba energie [kWh/kg]	0,780
Množství odpařené vody [kg/h]	361,59

Tabulka 6-1: Data pro návrh sušárny

6.2 Předběžný výpočet hlavních rozměrů sušárny

6.2.1 Výpočet otápné plochy

Z měrné odpařivosti a množství odpařené vody je možné vypočítat velikost plochy sušky, která je potřeba k odpaření vody.

$$S = \frac{\dot{m}_w}{\mu_s} \quad (6.2-1)$$

$$S = \frac{358,1}{3,469} = \underline{104,24 \text{ m}^2}$$

6.2.2 Výpočet otápného objemu

$$V = \frac{\dot{m}_w}{\mu_v} \quad (6.2-2)$$

$$V = \frac{358,1}{53,371} = 6,78 \text{ m}^3$$

6.2.3 Výpočet průměru a délky

$$S = \pi \cdot D \cdot L \quad (6.2-3)$$

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \quad (6.2-4)$$

Naše uvažovaná sušárna je kontaktní, otápěná horkou vodou proudící v trubkách, z čehož plyne, že primární je pro nás velikost otápěné plochy. Budu-li uvažovat, že poměr mezi délkou a průměrem bubnu sušárny je 0,26, stejně jako v případě experimentální sušárny, na které probíhalo měření v laboratořích, mohu vypočítat přibližné rozměry bubnu sušárny.

$$\frac{D}{L} = 0,26 \rightarrow D = 0,26 \cdot L$$

$$S = \pi \cdot 0,26 \cdot L^2$$

$$L = \sqrt{\frac{S}{0,26 \cdot \pi}}$$

$$L = \sqrt{\frac{103,23}{0,26 \cdot \pi}} = 11,3 \text{ m}$$

$$D = 0,26 \cdot 11,19 = 2,94 \text{ m}$$

Pouze pro kontrolu si můžeme vypočítat objem bubnu sušárny. Zjistíme, že pro zajištění potřebné otápěné plochy je nutné, aby sušárna byla výrazně rozměrnější než v případě, kdybychom uvažovali sušárnu konvekční, kde by rozhodoval právě objem bubnu sušárny.

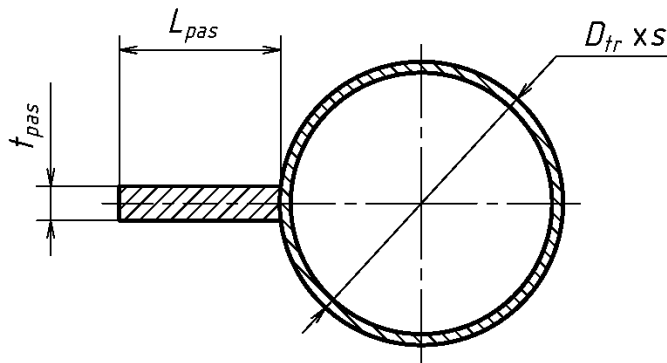
$$V = \frac{\pi \cdot 2,94^2}{4} \cdot 11,3 = 76,71 \text{ m}^3$$

6.3 Návrh skutečných rozměrů bubnu sušárny

Nyní, když znám předběžný průměr a délku bubnu, můžeme přistoupit k detailnímu návrhu uspořádání a rozměrů, které zajistí, že bude splněna podmínka velikosti otápěné plochy.

Plášť bubnu sušárny je tvořen z membránové stěny skružené do válce. Tato membránová stěna je tvořena z jednotlivých segmentů, které se skládají z trubky, jíž protéká topná voda, a přivařeného pásku, na který navazuje další trubka.

Pro zvýšení plochy otápěné bubnu při zachování objemu bubnu je dále vhodné vybavit sušárnu otápěnými lopatkami, které jsou tvořeny podobnými segmenty, jako samotná membránová stěna pláště.



Obrázek 6-1: Segment membránové stěny

Samotný návrh celého uspořádání je velmi komplexní a těžko se matematicky vyjadřuje tak, aby případný návrhář pouze dosadil do vztahů žadané hodnoty a vypočítal jednotlivé rozměry a počty.

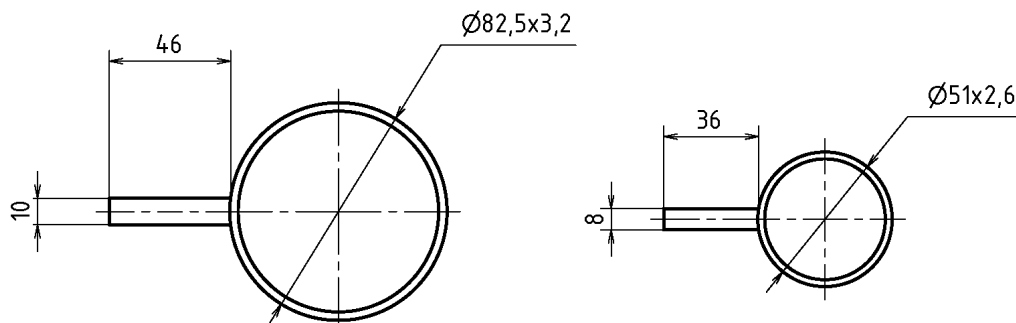
Osobně jsem návrh prováděl v počítačovém softwaru Autodesk Inventor, ve kterém jsem podle předběžné délky a průměru vytvořil model bubny a doplnil ho o lopatky. Následně jsem postupně upravoval rozměry a uspořádání „metodou pokus-omyl“ a průběžně podle níže uvedených vzorců kontroloval výslednou otápenou plochu.

$$S_{seg} = \frac{D_{tr}^{seg} \cdot \pi}{2} + L_{pas}^{seg} \quad [m^2/m] \quad (6.3-1)$$

$$S_{lop} = n_{tr} \cdot D_{tr}^{lop} \cdot \pi + n_{pas} \cdot 2 \cdot L_{pas}^{lop} \quad [m^2/m] \quad (6.3-2)$$

$$S_{buben} = (n_{seg} \cdot S_{seg} + n_{lop} \cdot S_{lop}) \cdot L \quad (6.3-3)$$

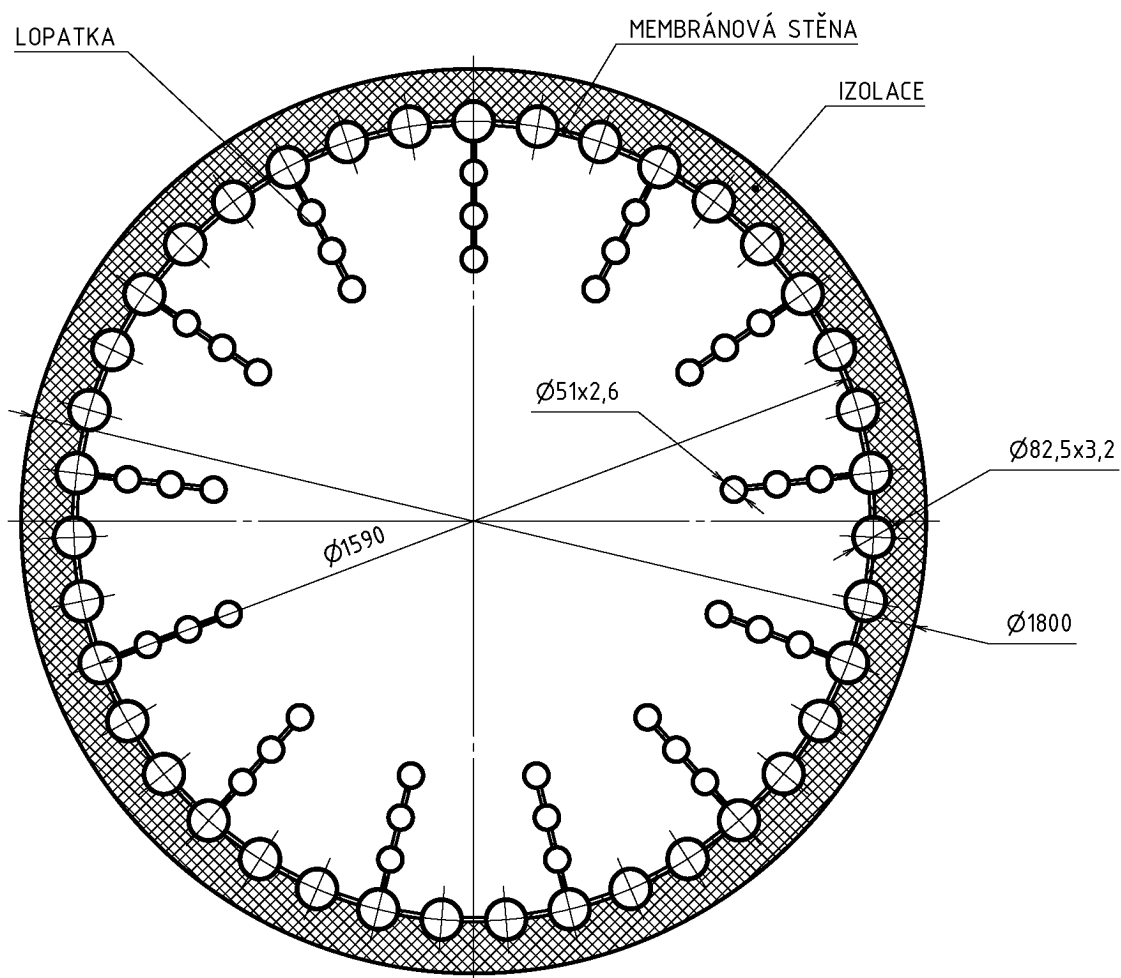
Jakmile jsem dosáhl uspokojivého přiblížení k požadované hodnotě prohlásil jsem rozměry za finální. Rozměry segmentů jsou zobrazeny na *Obrázku 6-2*.



Obrázek 6-2: Navrhované rozměry segmentu pláště a segmentu lopatky

Výsledný buben sušárny je složen z 39 hlavních segmentů uspořádaných vedle sebe na roztečné kružnici o průměru 1590 mm. Na každém třetím segmentu je umístěna lopatka, ta se skládá ze tří lopatkových segmentů; dohromady je to 13 lopatek složených ze 39 segmentů. Celková délka bubnu je 6,5 m, buben je mimo lopatek opatřen i vláknitou izolací z vnější strany, aby byly sníženy tepelné ztráty.

S uvedenými rozměry a počty segmentů se mi podařilo navrhnout buben sušárny, jehož vnitřní plocha je rovna $S = 103,38 \text{ m}^2$. Hmotnost celého bubnu včetně izolace je necelých deset tun.



Obrázek 6-3: Průřez bubnu navrhované sušárny

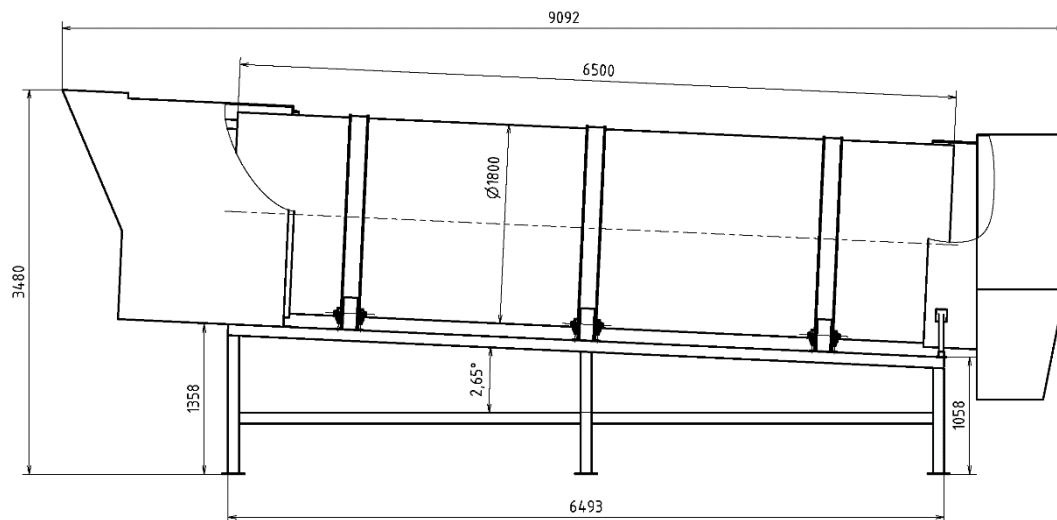
6.4 Konstrukční provedení sušárny

Trubky bubnu jsou propojeny tak, aby topná vody byla rozvedena po celém obvodu bubnu a také do lopatek. Vstup a výstup vody je řešen přes tzv. rotační přívod, jež umožňuje přívod tekutého média ze stacionární součásti do součásti rotující.

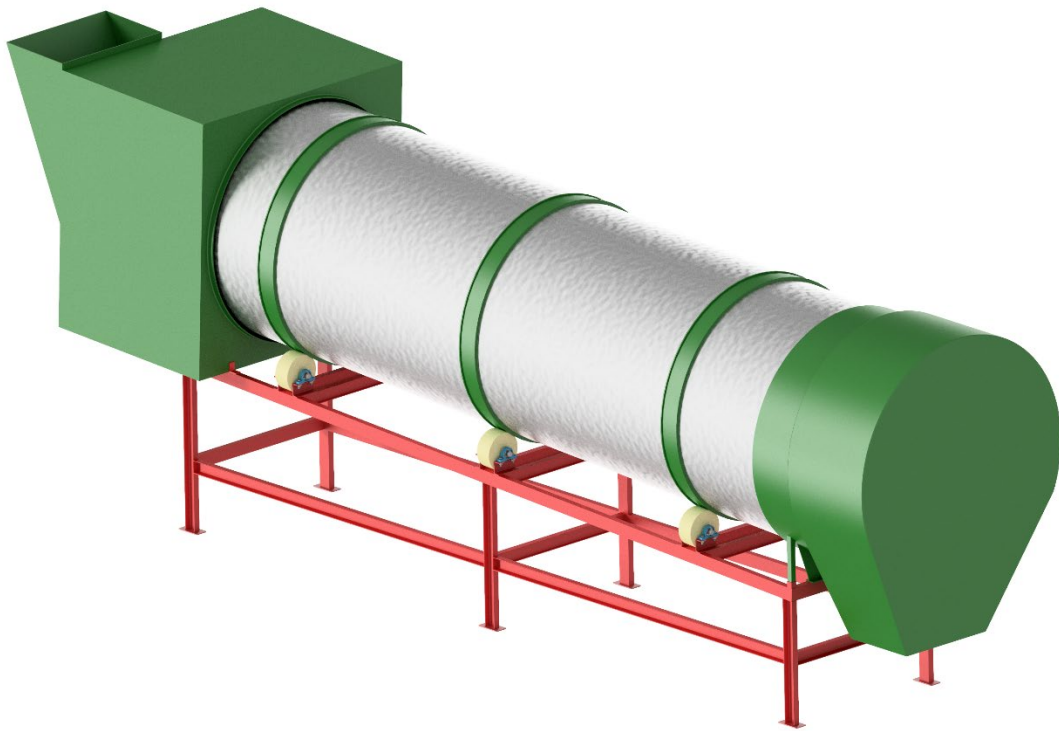
Celý buben je opatřen třemi prstenci, které umožňují usazení sušárny na rolny, které jsou usazeny v ložiskách. K jedné nebo více rolnám by pak byl přes spojku a převodovku připojen elektromotor, který by celý buben roztáčel.

Rolny v ložiskách jsou umístěny na rámu, na kterém leží celá sušárna. Rám je konstruován tak, aby celý buben byl nakloněn, což spolu s otáčením zajistí pohyb sušeného materiálu, resp. paliva vpřed.

Na výše položeném konci se nachází skříň sušárny, přes kterou se skrze násypku dopravuje sušené palivo dovnitř bubnu. Na opačném konci je výsypka, ze které vypadává již vysušené palivo.



Obrázek 6-4: Celkový náčrt sušárny s hlavními rozměry



Obrázek 6-5: 3D render navrhované sušárny biomasy

7 Návrh kondenzátoru brýdových par

Hned v úvodu této kapitoly bych rád zdůraznil, že následující návrh kondenzátoru je pouze přibližný a zanedbává mnoho faktorů, jako jsou tlakové ztráty, fouling, koroze, pevnostní výpočty a další. Rovněž i některé termotechnické výpočty jsou pouze přibližné; zejména výpočet součinitele přestupu tepla při kondenzaci binární směsi vodní páry s inertním plynem přesahuje rozsah této práce, a proto jeho hodnota byla pouze odhadnuta.

Některé postupy a myšlenky jsou převzaty z materiálu [8]. Pro orientaci o běžně vyráběných polotovarech a druhovýrobci jsem využíval online katalog společnosti Feron, a.s. [9].

7.1 Vstupní data

Z kapitoly 4.6 už známe vstupní i výstupní teploty i hmotnostní průtoky obou médií vstupující do výměníku, resp. kondenzátoru. Rovněž víme, že médii jsou voda a brýdová pára vystupující ze sušárny biomasy.

Průtok brýdové páry	$\dot{M}_{bp} = 0,1 \text{ kg/s}$
Vstupní teplota páry	$t_{bp1} = 99,12^\circ\text{C}$
Výstupní teplota kondenzátu	$t_{bp2} = 97,04^\circ\text{C}$
Průtok vody	$\dot{M}_v = 4,777 \text{ kg/s}$
Vstupní teplota vody	$t_{v3} = 70^\circ\text{C}$
Výstupní teplota vody	$t_{v4} = 78,12^\circ\text{C}$

Tabulka 7-1: Hmotnostní průtoky a teploty médií kondenzátoru

7.2 Koncepce kondenzátoru

Pro typ kondenzátoru byla zvolena nejjednodušší možná varianta, a sice trubkový výměník, jednotahový, vertikální, s přímými trubkami a pevnými trubkovnicemi. Vzhledem k faktu, že pára odcházející ze sušárny bude obsahovat velké množství pevných nečistot, bude její kondenzace probíhat v trubkovém svazku. Drobné částice biomasy vynášené párou ze sušky, které ulpívají na stěně svislých trubek, budou kondenzátem samovolně odplavovány. Vzduch, který do výměníku vstupuje spolu s parou bude z výměníku odváděn do okolí otevřeným výstupem. V mezitrubkovém prostoru kolem svazku trubek pak bude proudit voda, která se bude ohřívat.

7.3 Tepelné výpočty

Protože výstupní teplotu vody už známe z kapitoly 4.6, zbývá určit pouze výkon výměníku neboli množství předaného tepla (7.3-1) a střední logaritmický teplotní spád (7.3-2).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t = \dot{M}_v \cdot c_v \cdot (t_{v4} - t_{v3}) \quad (7.3-1)$$

$$\underline{\dot{Q} = 162,57 \text{ kW}}$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta' - \Delta''}{\ln \frac{\Delta'}{\Delta''}} = \frac{(t_{bp1} - t_{v4}) - (t_{bp2} - t_{v3})}{\ln \frac{t_{bp1} - t_{v4}}{t_{bp2} - t_{v3}}} \quad (7.3-2)$$

$$\underline{\Delta t_{ln} = 23,89 \text{ K}}$$

Nyní známe dva členy ze základní rovnice pro tepelné výměníky (7.3-3), kde k je celkový součinitel přestupu tepla a A je teplosměnná plocha výměníku, resp. kondenzátoru. Odhadneme-li hodnotu celkového součinitele prostupu tepla, můžeme zjistit orientační teplosměnnou plochu. Při zvolení počtu trubek a konkrétního rozměru trubek jsme schopni určit potřebnou délku trubek, popř. analogicky v obráceném smyslu určit počet trubek pro zvolenou délku a rozměr trubky.

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta t_{ln} \quad (7.3-3)$$

Např. odhadneme-li hodnotu $k = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ je výsledná hodnota teplosměnné

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta t_{ln}} = \frac{160,45 \cdot 10^3}{1000 \cdot 23,95} = 6,8 \text{ m}^2$$

7.4 Hydrodynamické výpočty

7.4.1 Počet trubek

Pro zvolenou rychlost páry v trubkách $w_p = 20 \text{ m/s}$ a zvolený rozměr trubky TR16x1, můžeme pro daný hmotnostní průtok vypočítat počet trubek (podle vztahu 7.4-1), který bude třeba. Hustota páry pro danou teplotu je $\rho(t = 100^\circ\text{C}) = 0,598 \text{ kg/m}^3$.

$$n_{TR} = \frac{4 \cdot \dot{M}}{d_{TR}^2 \cdot \pi \cdot \rho_p} \quad (7.4-1)$$

$$n_{TR} = 54,5 \cong 55 \text{ trubek}$$

Pro tento počet trubek si můžeme spočítat rozteč trubek, ta se volí podle toho, jestli jsou trubky v trubkovnici zavařeny nebo zaválcovány, popř. obojí. V našem případě budeme

uvažovat, že trubky budou do trubkovnice zavařeny, protože se jedná o jednodušší řešení. Poté platí, že rozteč trubek je $p = (1,2 \div 1,4) \cdot D_{TR}$.

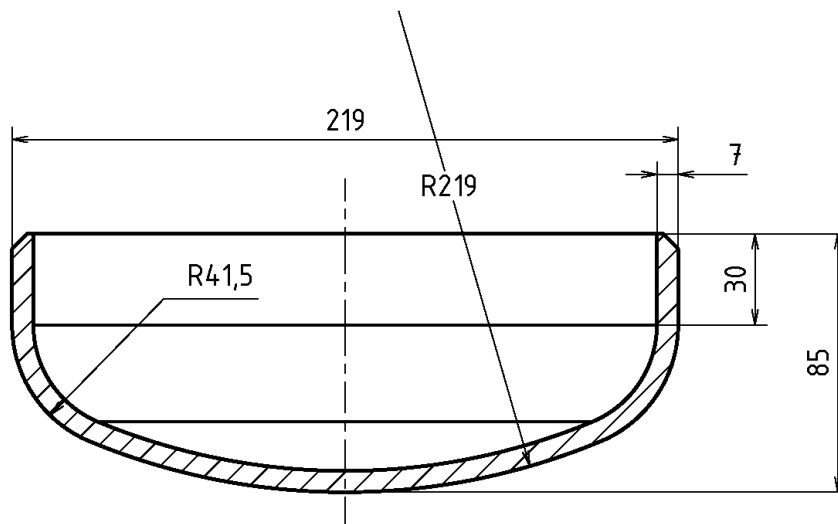
$$p = 1,3 \cdot 16 = 20,8 \text{ mm}$$

Z rozteče a průměru trubek můžeme nyní podle vztahu (7.4-2) spočítat minimální průměr pláště. Tento vztah platí pro tzv. trojúhelníkové uspořádání trubek, to má lepší využití prostoru než uspořádání do čtverce, a proto jej uvažujeme.

$$d_{pl} \geq 2 \cdot p \cdot \sqrt{\frac{n_{TR}}{1,15 \cdot \pi}} \quad (7.4-2)$$

$$d_{pl} \cong 159 \text{ mm}$$

Jelikož chceme, aby náš výměník byl co nejjednodušší a nejlevnější, je záhodné použít co největší množství předem vyrobených součástí, které se pouze nakoupí a po minimální strojní úpravě svaří dohromady. To platí zejména pro součásti jako jsou příruby a dna, podle nichž se tedy budeme orientovat. Obojí zmíněné se obvykle dodává v řadách DN (jmenovitá světlost). Nejbližší vyšší rozměr odpovídá světlosti DN200, pro klenuté dno je vnitřní průměr $d = 205 \text{ mm}$ a pro trubku, která bude tvořit plášť, je $d = 203 \text{ mm}$.

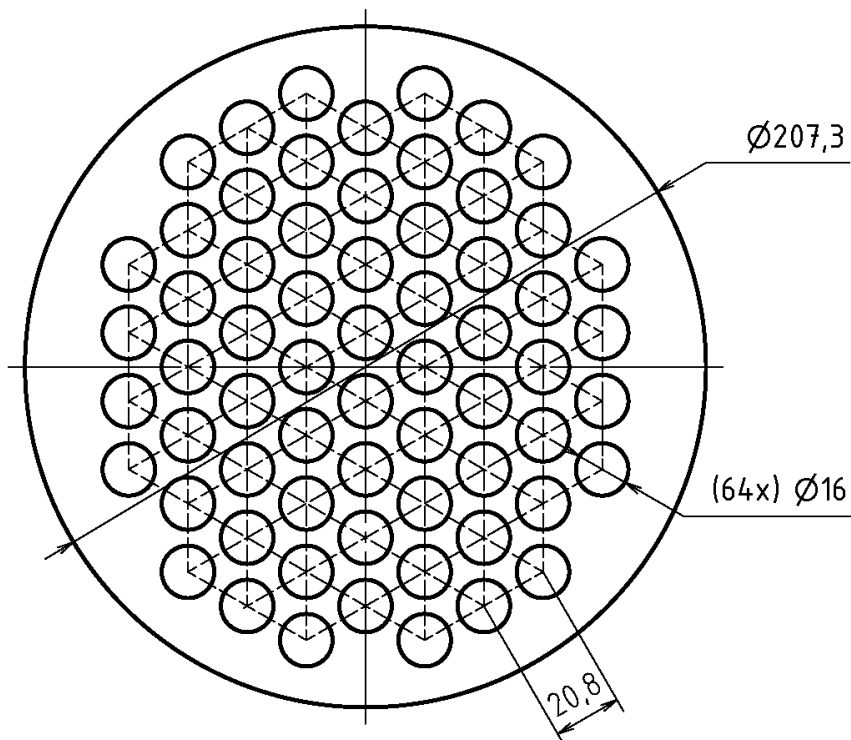


Obrázek 7-1: Návrh klenutého dna DN200 [9]

7.4.2 Návrh trubkového svazku

Budeme-li teď uvažovat zpětně a vypočítáme pro vnitřní průměr pláště $d_{pl} = 203 \text{ mm}$ počet trubek, dostaneme se na 86 trubek. V této fázi je lepší využít nějakého grafického softwaru typu AutoCAD a celé uspořádání si nakreslit. V mém případě jsem navrhl

trubkovnici a uspořádání trubek ve výměníku následovně. Konečný počet trubek jsem zvolil 64.



Obrázek 7-2: Návrh trubkovnice a uspořádání trubek v kondenzátoru

7.5 Součinitel přestupu tepla na vodní straně

Nyní můžeme přistoupit k výpočtu součinitele přestupu tepla na vodní straně, tedy v mezitrubkovém prostoru. Tato podkapitola čerpá z [10].

Protože chceme, aby přestup tepla byl co nevyšší, volíme variantu s usměrňujícími přepážkami, konkrétně segmentovými přepážkami. Pro tento případ platí řada vztahů, které zde uvedu v pořadí, jak byly při návrhu použity.

7.5.1 Látkové vlastnosti vody pro střední teplotu

Vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla počítají s několika látkovými vlastnostmi. Tyto látkové vlastnosti média, resp. vody, jsou určeny pro střední teplotu (aritmetický průměr vstupní a výstupní teploty) a tlak, který byl zvolen na hodnotu $p = 0,4 \text{ MPa}$. Tento tlak by měl zajistit, že ani při teplotě 140°C nedojde k vypaření vody a je klíčový pro systém jako takový.

$$t_{stř} = \frac{t_{v3} + t_{v4}}{2} = 74,06^\circ\text{C}$$

Hustota	$\rho_v = 975,55 \text{ kg/m}^3$
Měrná tepelná kapacita	$c_{pv} = 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
Tepelná vodivost	$\lambda_v = 0,663 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Kinematická viskozita	$\nu = 3,92 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

Tabulka 7-2: Látkové vlastnosti vody v mezitrubkovém prostoru kondenzátoru

7.5.2 Použité vztahy

$$S_D = L \cdot \Sigma e \quad (7.5-1)$$

$$S_L = \frac{d_{pl} \cdot (b - a) + 2 \cdot a \cdot h}{4} - n_u \cdot \frac{\pi \cdot D_{TR}^2}{4} \quad (7.5-2)$$

$$S = \sqrt{S_L \cdot S_D} \quad (7.5-3)$$

$$D_h = \frac{d_{pl}^2 - n_{TR} \cdot D_{TR}^2}{d_{pl} + n_{TR} \cdot D_{TR}} \quad (7.5-4)$$

$$w = \frac{\dot{M}_v}{\rho_v \cdot S} \quad (7.5-5)$$

$$Re = \frac{w \cdot D_h}{\nu} \quad (7.5-6)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho_v \cdot c_{pv}}{\lambda_v} \quad (7.5-7)$$

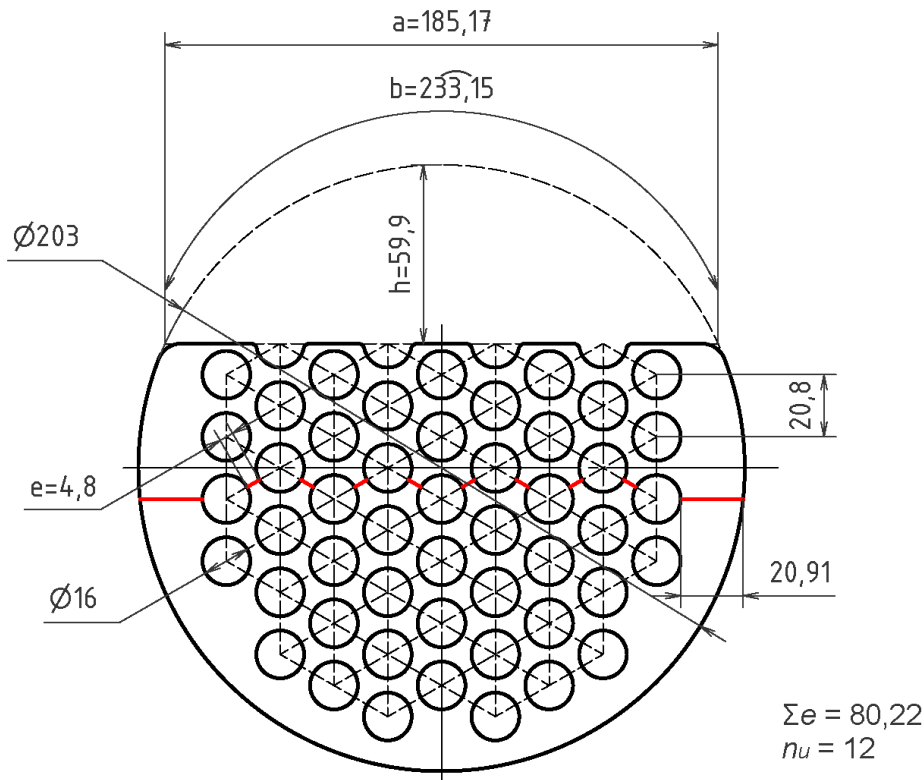
$$Nu = C \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \quad (7.5-8)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{D_h} \quad (7.5-9)$$

7.5.3 Návrh přepážek

V první řadě je nutné provést návrh segmentových přepážek. Jejich obvyklá výška je $h_p = (0,6 \div 0,8) \cdot d_{pl}$ a jejich rozteč $L = (0,2 \div 1) \cdot d_{pl}$. Pro zvolenou výšku přepážky $h_p = \frac{d_{pl}}{2} + 2 \cdot t = 143,1 \text{ mm}$ snadno dopočítáme výšku kruhové úseče h . Hodnoty a (délka tětivy) a b (délka oblouku) můžeme buď dopočítat podle vzorců pro kruhovou úseč, nebo stejně jako v případě trubkovnice překreslíme přepážku do softwaru a odměříme.

Rovněž je nutné dopočítat, resp. odečíst hodnotu Σe (součet volných vzdáleností mezi trubkami podél vodorovného průměru pláště) a určit počet trubek procházející kruhovou úsečí n_u .



Obrázek 7-3: Návrh usměrňovací přepážky

Dále je nutné zvolit si rozteč mezi jednotlivými přepážkami L . Následně pak můžeme podle vztahů (7.5-1), (7.5-2) a (7.5-3) vypočítat průtočné průřezy podél trubek S_L a kolmo k trubkám S_D a z nich celkový mezitrubkový průtočný průřez S .

Pro zvolenou rozteč $L = 200 \text{ mm}$ a uvedené rozměry kruhové úseče jsou hodnoty průtočných průřezů následující:

$$S_L = 5,568 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$S_D = 1,604 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$S = 9,452 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

7.5.4 Výpočet hodnot pro kritériální rovnici

Hydraulický průměr $D_h = 20,23 \text{ mm} = 2,023 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

Rychlost proudění $w = 0,518 \text{ m/s}$

Reynoldsonovo číslo $Re = 26731,26$

Prandtlovo číslo $Pr = 2,42$

Ve skriptech [10] je stanoven rozsah platnosti kritériální rovnice na $D_h = \langle 0,75 \cdot 10^{-2}; 5 \cdot 10^{-2} \rangle m$ a $Re = \langle 4; 5 \cdot 10^4 \rangle$. V obou případech se pohybujeme v intervalu platnosti.

Součinitel C ve vztahu (7.5-8) charakterizuje vliv usměrňujících přepážek. Jeho hodnota byla vybrána podle skript na $C = 0,25$.

Hodnota Nusseltova čísla byla stanovena na $Nu = 152,04$ a konečně hodnota součinitele přestupu tepla na straně vody je $\alpha_{ex} = 4981,72 W/m^2 \cdot K$.

7.6 Celkový součinitel prostupu tepla

Pro získání celkového součinitele prostupu tepla k je nutné znát všechny součinitele jednotlivých typů sdílení tepla, které se v daném případě vyskytují. V našem případě součinitele přestupu tepla na straně vody a na straně páry – α_{in}, α_{ex} – a také veličiny charakterizující přenos tepla vedením, tedy součinitel tepelné vodivosti λ_{tr} a tloušťku teplosměnné trubky s .

Tloušťku teplosměnné trubky jsem si stanovil na $s = 1 mm$; za předpokladu, že trubka bude vyrobena z nerezové oceli, lze snadno dohledat, že součinitel tepelné vodivosti se pohybuje okolo hodnoty $\lambda_{tr} = 33 W/m \cdot K$.

V úvodu kapitoly již bylo předznamenáno, že výpočet součinitele přestupu tepla při kondenzaci směsi páry s inertními (nekondenzujícími) plyny je značně komplikovaný. Opět se odkazují na zdroj [7], který se touto problematikou zabývá. Na základě experimentálního měření jsou zde stanoveny hodnoty součinitele přestupu tepla při kondenzaci směsi vodní páry a vzduchu v trubkách výměníku. Pro konkrétní případ počtu trubek 64, délky trubek 0,66 m a teploty chladicí vody 70°C je zde uvedena hodnota $\alpha_{in} = 4042 W/m^2 \cdot K$. Na základě tohoto materiálu a konzultace s Ing. Janem Havlíkem, Ph.D. byla hodnota pro náš případ stanovena na $\alpha_{in} = 4000 W/m^2 \cdot K$.

Nyní, když známe všechny hodnoty, můžeme spočítat nejprve součinitel prostupu tepla vztažený na jeden metr délky a následně i celkový součinitel prostupu tepla.

$$k_{1m} = \frac{1}{\frac{2}{\alpha_i \cdot d_{TR}} + \frac{1}{\lambda_{TR}} \cdot \ln\left(\frac{D_{TR}}{d_{TR}}\right) + \frac{2}{\alpha_e \cdot D_{TR}}} \quad (7.6-1)$$

$$\underline{k_{1m} = 96,88 W/m \cdot K}$$

$$k = \frac{k_{1m}}{\pi \cdot d_{stř}} = \frac{k_{1m}}{\pi \cdot \frac{D_{TR} - d_{TR}}{\ln \frac{D_{TR}}{d_{TR}}}} \quad (7.6-2)$$

$$\underline{k = 2059 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

7.7 Teplosměnná plocha kondenzátoru a délka trubek

Ze známé hodnoty součinitele prostupu tepla můžeme podle *vztahu (7.3-3)* určit finální velikost teplosměnné plochy a z ní následně i potřebnou délku trubek podle rozměru, který jsem dříve zvolil. Jedná se o čistou délku trubek, které tvoří teplosměnnou plochu. Skutečná délka trubek je vyšší o tloušťku trubkovic a přesah pro přivaření trubek.

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta t_{ln}} = 3,3 \text{ m}^2$$

$$l_{TR} = \frac{A}{n_{TR} \cdot D_{TR} \cdot \pi} \quad (7.7-1)$$

$$\underline{l_{TR} = 1,027 \text{ m} \rightarrow 1,03 \text{ m}}$$

7.8 Výpočet vstupních a výstupních hrdel

Ve výměníku bude celkem pět hlavních vstupů a výstupu, resp. hrdel – vstup a výstup vody do prostoru pláště, vstup páry, výstup kondenzátu a výstup nekondenzujících plynů.

Postup návrhu hrdel byl následující; pro každé médium jsem zvolil rychlost z doporučeného rozsahu, podle *vztahu (7.8-1)* jsem dopočítal průměr trubky. Podle tohoto průměru jsem podle běžně vyráběných tlakových trubek zvolil vhodný rozměr a zpětně dopočítal rychlost proudění a zkontroloval, zda tato rychlost stále spadá do intervalu doporučených rychlostí.

$$d_{TR} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{M}}{w \cdot \pi \cdot \rho}} \quad (7.8-1)$$

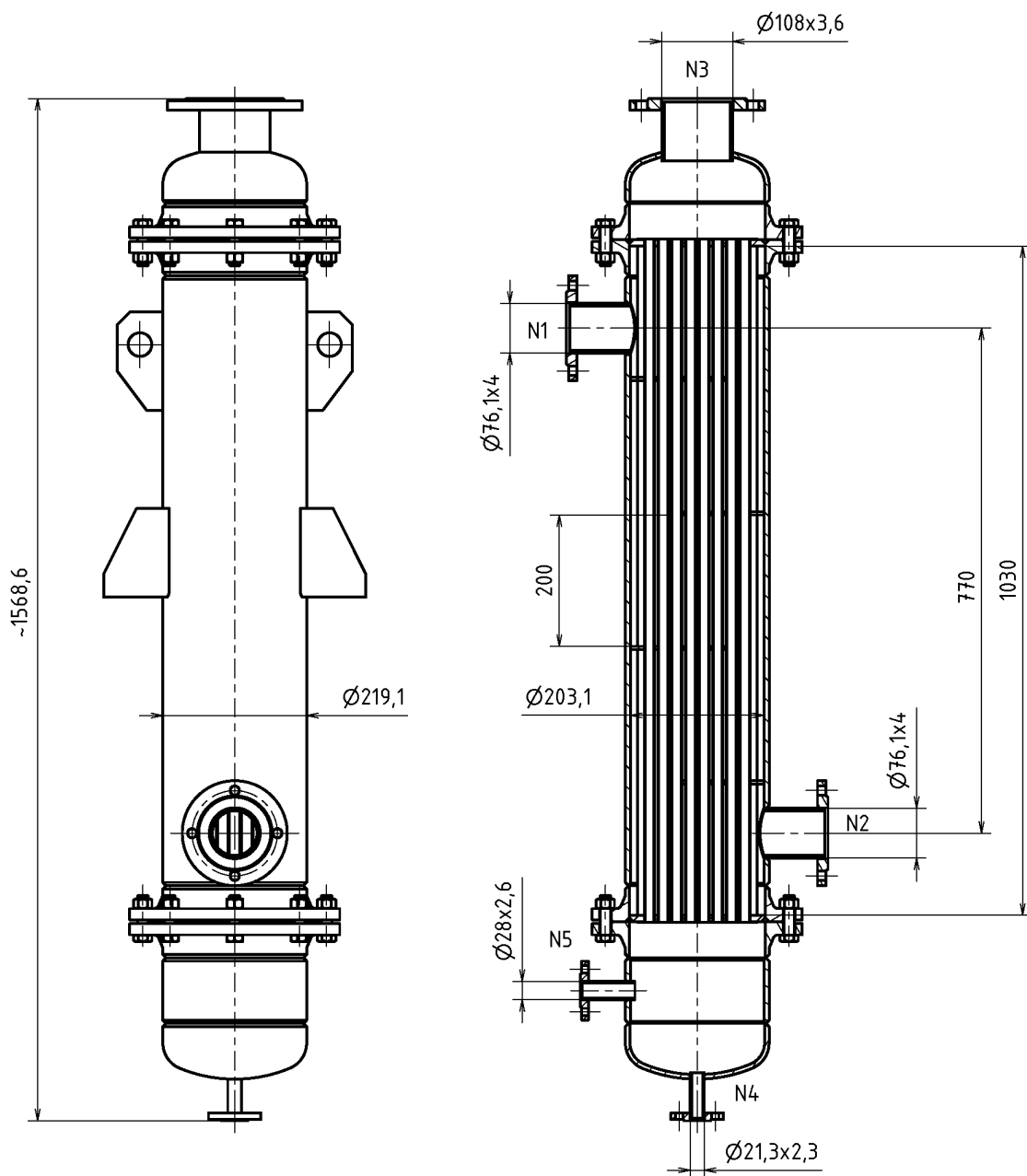
Médium	Označení hrdla	Zvolená rychlost	Navržený rozměr trubky	Příruba
Voda	N1, N2	1,5 m/s	TR76,1x4	DN65 PN6
Pára	N3	20 m/s	TR108x3,6	DN100 PN6
Kondenzát	N4	0,4 m/s	TR21,3x2,3	DN15 PN6
Vzduch	N5	13 m/s	TR28x2,6	DN20 PN6

Tabulka 7-3: Tabulka hrdel

7.9 Konstrukční provedení kondenzátoru

Plášť kondenzátoru je svařen z trubky TR219,1x8 a dvou přírub s krkem DN200. Na tyto příruby přiléhají z obou konců další příruby s krkem, které spolu s klenutými dny DN200 plášť uzavírají. Spodní dno kondenzátoru je částečně prodlouženo pro dobrý odvod inertních plynů, resp. vzduchu, a možnost hromadění kondenzátu bez rizika zaplavení hrdla N5.

Všechna hrdla jsou opatřena plochými přivařovacími přírubami. Plášť kondenzátoru je dále vybaven závěsnými oky pro transport a také patkami, které umožňují usazení kondenzátoru ve svislé poloze.



Obrázek 7-4: Návrh navrhovaného kondenzátoru

8 Ekonomická analýza

Z předchozích kapitol už víme, že spalování paliva o nižší vlhkosti má pozitivní vliv na spalovací proces a na účinnost kotle, a tedy integrace sušárny, zejména v kombinaci s kondenzátorem brýdové páry, vede ke zvýšení celkové účinnosti cyklu.

Nyní je třeba ještě stanovit, zdali integrace sušení přinese i patřičný přínos z ekonomického hlediska. Pro ekonomické zhodnocení tohoto opatření bude nejsnazší určit dobu návratnosti investice. K tomu je třeba nejprve odhadnout investiční náklady a jak se změní provozní náklady, konkrétně náklady na nákup paliva.

8.1 Stanovení investičních nákladů

Danou investicí porovnáváme s případem, kdy původní výtopenský systém již pracuje a pouze se připojí systém pro sušení biomasy. Hmotnostní tok vody pro vytápění se nezmění a teplota, na kterou kotel vodu ohřívá, se změní jen mírně, resp. se poměr vstupní a výstupní vody pouze zvýší ze 120/70 na 133,4/78,1 (viz 4.6.4). Kotel tedy zůstane stejný a většinu investičních nákladů bude tvořit pouze cena sušárny a kondenzátoru.

8.1.1 Odhad ceny sušárny biomasy

Sušárna byla při odhadu ceny rozdělena na části, ze kterých se skládá. Jednotlivé části pak byly oceněny na základě koeficientu, jež v sobě zahrnuje náklady na materiál a také náklady na jeho přetvoření v danou komponentu; oba náklady jsou vztaženy na kilogram materiálu. Tyto koeficienty byly stanoven na základě konzultace s vedoucím práce. Hmotnost jednotlivých komponent bylo možné stanovit podle softwaru Autodesk Inventor, ve kterém jsem model sušárny vytvořil.

Pro buben sušárny, jakožto složitější součást na výrobu je koeficient kilogramové ceny materiálu uvažován $K_{KC} = 300 \text{ Kč/kg}$ a u ostatních součástí $K_{KC} = 250 \text{ Kč/kg}$.

Součást	Hmotnost [kg]	Cena [Kč]
Buben	5000	1.500.000
Rám	500	125.000
Násypka	1200	300.000
Výsypka	900	225.000

Tabulka 8-1: Odhad hlavních komponent sušárny na základě jejich hmotnosti

Další nedílnou částí sušárny je elektroinstalace a systémy měření a regulace, jejich cena byla odhadnuta (opět na základě konzultace) na 250 tisíc Kč. Poslední položkou jsou drobné

komponenty sušárny jako elektromotory, spojky, ložiskové domky a další, jejichž cena byla odhadnuta na 100 tisíc Kč.

Součást	Cena [Kč]
Buben	1.500.000
Rám	125.000
Násypka	300.000
Výsypka	225.000
Elektroinstalace a MaR	250.000
Další komponenty	100.000
Celková cena	2.500.000

Tabulka 8-2: Celková cena sušárny

8.1.2 Odhad ceny kondenzátoru brýdové páry

Odhad ceny kondenzátoru brýdové páry bude v porovnání se sušárnou značně jednodušší. Při jejím odhadu jsem vycházel z ceny a teplosměnné plochy kondenzátoru, který se již nachází v laboratořích na Julisce. Jeho teplosměnná plocha je 3,7 m² a pořizovací cena byla cca 100 tisíc Kč. Teplosměnná plocha mnou navrženého kondenzátoru je 3,3 m². Budu-li uvažovat, že cena kondenzátoru je přímo úměrná teplosměnné ploše, lze snadno odhadnout pořizovací náklady pro náš případ.

$$N = 100\,000 \cdot \frac{3,3}{3,7} = 89\,189 \approx \mathbf{90\,000\,Kč}$$

Po sečtení obou položek je celková suma navýšena o 25%, které představují náklady na montáž, dovoz a další drobné náklady.

Součást	Cena [Kč]
Sušárna	2.500.000
Kondenzátor	90.000
Montáž a dovoz (25%)	647.500
Celkové náklady	3.235.500

Tabulka 8-3: Celkové investiční náklady

Celkové náklady jsem dále navýšil o 10%, které představují rezervu. Investiční náklady integrace sušení do hypotetického vytopenského systému tak byly odhadnuty na **3.561.250 Kč**.

8.2 Stanovení provozních nákladů

Určení provozních nákladů spočívá pouze v určení nákladů na pořízení paliva. Uvažujeme dvě varianty, první bez sušení, kdy je spalováno kvalitní palivo (vlhkost cca 10% a výhřevnost cca 16 MJ/kg), a druhá varianta se sušením, kdy je rovněž spalováno podobně kvalitní palivo. Rozdíl spočívá v tom, že v prvním případě je palivo nakupováno externě za poměrně vysokou cenu a v druhém případě je nakupována velmi vlhká biomasa (vlhkost cca 60%) za výrazně nižší cenu a je následně sušena na parametry podobné palivu z první varianty.

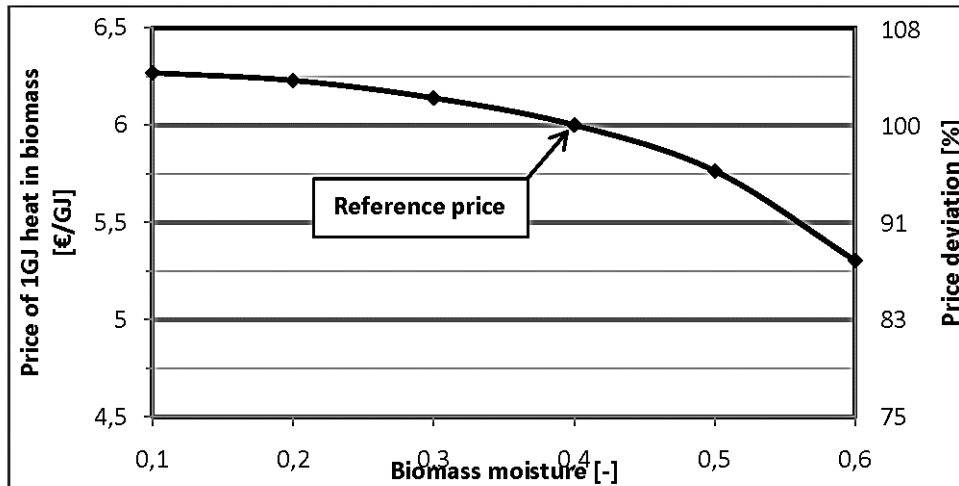
8.2.1 Systém bez sušení

Spotřeba paliva pro první variantu je 259,5 kg/hod. Palivo, které je spalováno, jsou rostlinné pelety, jejichž cena v ČR se pohybuje okolo 3.200 Kč/t. Takové pelety vyrábí např. společnost Ekover. Ta uvádí, že pelety jsou 100% tvořeny rostlinnými pletivy. Nabízejí několik kategorií paliv, které se liší podle materiálu použitého na výrobu. Jedná se obecně o odpadní rostlinný materiál, slámu obilovin a olejnin, odpad z papírenského průmyslu apod. Tyto materiálu jsou pak lisovány do tvaru pelet anebo briket.

Udávaná průměrná vlhkost je 8–15% a průměrná výhřevnost 14–17 MJ/kg. Díky použitému materiálu mohou palivo nabízet za uvedenou cenu; pro srovnání cena dřevěných pelet v ČR začíná na částce 5.000 Kč/t. [11; 12]

8.2.2 Systém se sušením

V případě varianty se sušením je spotřeba paliva vyšší vlivem ohřevu vody na vyšší teplotu – 287,4 kg/hod. Palivo, které je v tomto případě nakupováno, není samo o sobě vhodné pro spalování vlivem vysoké vlhkosti. Určení jeho jednotkové ceny není tak jednoznačné, v ideálním případě může být rovna pouze nákladům na dopravu paliva. Při stanovení ceny velmi vlhké biomasy jsem vycházel ze zdroje [13].



Graf 8-1: Cena za GJ biomasy v závislosti na její vlhkosti [13]

Zde je pro vlhkost 60% uvedena cena ~5,35 €/GJ. Při uvažované hodnotě výhřevnosti pro biomasu s 60% obsahem vody 6 MJ/kg a průměrném kurzu Eura v roce 2015 (rok vydání článku [13]) 27,283 Kč/€ dostaneme hodnotu cca 876 Kč/t.

8.2.3 Úspora nákladů na palivo

Pro uvažovanou hodnotu ročního využití systému 2.500 hodin/rok můžeme snadno dopočítat roční náklady na palivo pro obě varianty a z rozdílu zjistit jaká bude roční úspora na palivu při integraci sušení do systému.

Varianta	Spotřeba paliva [kg/h]	Cena paliva [Kč/t]	Roční náklady [Kč/rok]
Bez sušení	259,5	3.200	2.076.099
Se sušením	286,7	876	627.798
Roční úspora na palivu [Kč/rok]			1.448.302

Graf 8-2: Roční úspora v palivu

8.3 Doba návratnosti

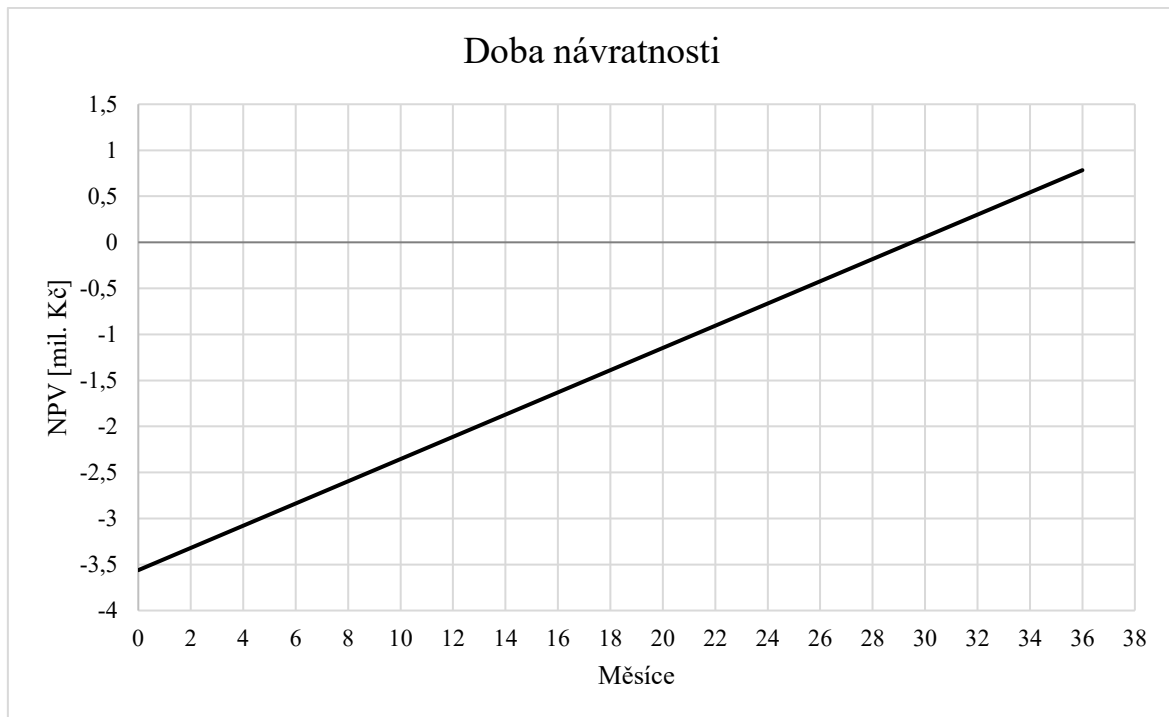
Jelikož jiné výnosy ani náklady dané opatření nepřináší, můžeme prohlásit, že roční úspora v palivu je rovna cash-flow.

$$CF = 1\,448\,302 \text{ Kč/rok}$$

A podle jednoduchého vztahu můžeme stanovit prostou dobu návratnosti.

$$PP = \frac{IN}{CF} \tag{8.3-1}$$

$$PP = \frac{3\,561\,250}{1\,448\,302} = \underline{2,459 \text{ let} \cong 29 \text{ měsíců } 15 \text{ dní}}$$



Graf 8-3: Čistá současná hodnota investice v čase

8.4 Shrnutí

Z doby návratnosti je zřejmé, že investice jako taková je velmi výhodná, zvláště pak, pokud životnost tohoto opatření bude minimálně 10 let, ale pravděpodobně i více.

Dalo by se polemizovat nad použitím jiného paliva pro systém bez sušení. Nabízí se například dřevěné brikety, ty dosahují podobných parametrů jako dřevěné pelety, avšak i jejich cena je srovnatelná [14]. Další možností mohla být dřevěná štěpka. Zde je cena obecně nižší, ale pohybuje se ve velkém rozmezí v závislosti na vlhkosti. Problémem je, že vlhkost dřevní štěpky se v průběhu roku mění a může se stát, že zajistit stálou dodávku většího množství štěpky o stejné kvalitě bude problematické.

Je také nutné poznamenat, že investiční náklady by ve skutečnosti mohly být nezanedbatelně vyšší vlivem dalších nákladů na opatření a také podceněním pořizovací ceny sušárny a kondenzátoru.

8.5 Citlivostní analýza

Jak již bylo výše předznamenáno, pořizovací cena integrace sušení biomasy byla pouze odhadnuta, stejně tak byla odhadnuta i jednotková cena za mokrou biomasu. Z tohoto důvodu je ekonomická analýza doplněna ještě o citlivostní analýzu. Investiční náklady a cena vlhké biomasy budou měněny v určitém rozmezí a budeme sledovat, jak se tato změna promítne na době návratnosti.

8.5.1 Investiční náklady

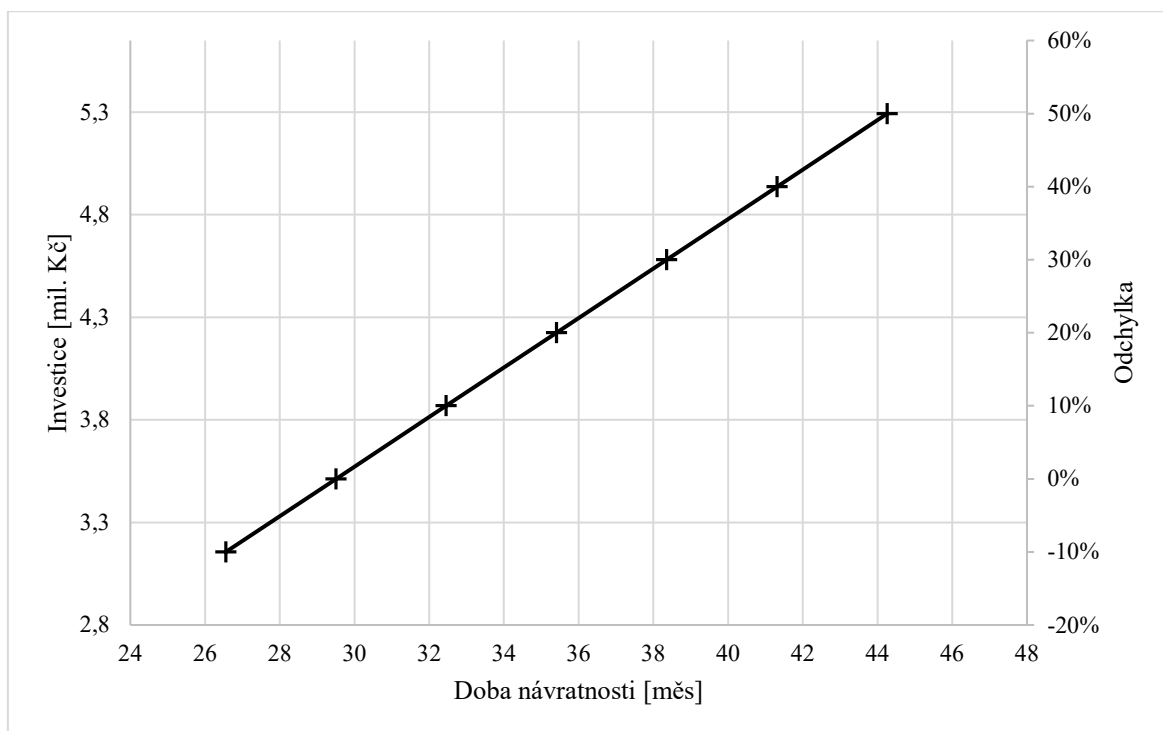
Rozmezí změny pro investiční náklady jsem zvolil od -10% do +50%.

Odchylka	-10%	0%	10%	20%	30%	40%	50%
Investice [Kč]	3205125	3561250	3917375	4273500	4629625	4985750	5341875
PP [měs]	26,556	29,507	32,458	35,408	38,359	41,310	44,260

Tabulka 8-4: Vliv změny investičních nákladů na dobu návratnosti

Poněvadž doba návratnosti je pouze podíl investičních nákladů a cash-flow, není žádným překvapením, že pokud investiční náklady vzrostou o 30%, tak i doba návratnosti vzroste o 30%.

V případě, že by tedy investiční náklady byly např. o 50% vyšší, než jsem odhadoval, zvýší se o 50% i doba návratnosti. To je sice významný nárůst, pořád se ovšem jedná o dobu návratnosti do čtyř let, což je při uvažované minimální životnosti deseti let méně než polovina.



Graf 8-4: Vliv investičních nákladů na dobu návratnosti

8.5.2 Cena vlhké biomasy

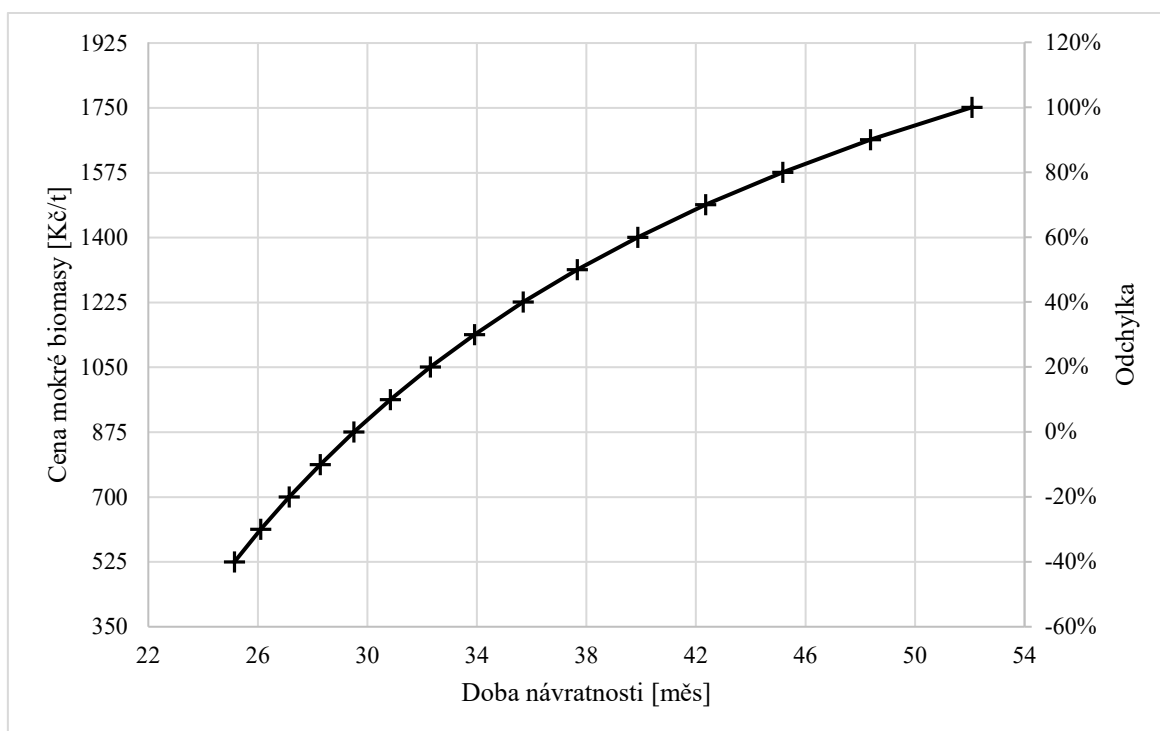
Pro cenu vlhké biomasy jsem zvolil rozmezí změny od -40% do +100%.

Odchylka	-40%	-20%	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Cena VB [Kč/t]	525,6	700,8	876	1051,2	1226,4	1401,6	1576,8	1752
PP [měs]	25,147	27,153	29,507	32,308	35,696	39,879	45,171	52,084
Odchylka PP	-14,78%	-7,98%	0,00%	9,49%	20,98%	35,15%	53,09%	76,51%

Tabulka 8-5: Vliv ceny vlhké biomasy na dobu návratnosti

V případě změny ceny vlhké biomasy není změna doby návratnosti tak jednoznačná jako v předchozím případě, tempo její změny je však ještě mírně pomalejší než v případě změny investičních nákladů.

Ku příkladu, pokud by nakupovaná vlhká biomasa byla dvakrát dražší, než jsem uvažoval, doba návratnosti investice by se zvýšila o cca 77%. Z toho vyplývá, že i při dvojnásobné ceně vlhké biomasy by investice zůstala výhodná, protože doba návratnosti by stále byla kratší než polovina uvažované minimální doby životnosti opatření.



Graf 8-5: Vliv ceny vlhké biomasy na dobu návratnosti

9 Závěr

Pro náš hypotetický výtopenský systém, který by měl k dispozici ke spalování biomasu o vlhkosti 60%, by integrace sušárny a kondenzátoru brýdové páry, při vysušení paliva na vlhkost 10%, přinesla nárůst celkové účinnosti cca deset procentních bodů, tj. zvýšení o cca 12,6%. Přínos sušení ve formě vyšší účinnosti by byl ještě vyšší při vyšší vstupní vlhkosti paliva nebo při vyšší hodnotě vysušení.

Mimo navýšení účinnosti spočívá výhoda integrace sušení ve faktu, že by bylo možné spalovat i paliva s vlhkostí vyšší než 55%, což je obecně považováno za hranici spalitelnosti. Rovněž by se spalovací proces obecně zkvalitnil, což by se nejvíce projevilo na snížení emisí CO.

V rámci této práce byla provedena sada měření na experimentální sušárně v laboratořích ústavu energetiky na Julisce. Tato měření mi umožnila stanovit závislosti měrných odpařivostí této sušárny při proměnných provozních parametrech sušárny. Potvrdilo se, že teplota otopu stejně jako objemové zaplnění přímou měrou zvyšuje měrné odpařivosti sušárny a urychluje tím sušicí proces. Zároveň byla data z měření použita při návrhu sušárny do zkoumaného výtopenského systému.

Navržená sušárna je rotační bubnová sušárna otápěná horkou vodou z kotle. Velikost otápěné plochy je 103,38 m², průměr bubnu je 1590 mm a délka 6,5 m. Mimo návrhu sušárny byl proveden také návrh kondenzátoru brýdové páry. Tento kondenzátor využívá páru ze sušárny, která by jinak byla považována za odpadní. Tato pára je použita k předeřevu vratné vody z otopné soustavy, čímž se dále zvyšuje celková účinnost systému. Teplosměnná plocha navrženého kondenzátoru je 3,3 m² při počtu trubek 64 o délce 1030 mm.

Na základě odhadu investičních nákladů na sušárnu a kondenzátor a určení roční úspory nákladů na nákup paliva bylo možné určit prostou dobu návratnosti tohoto opatření na přibližně 29 měsíců a 15 dní (cca 2,5 roku). Byla rovněž provedena citlivostní analýza, aby se ukázalo, jak by se doba návratnosti změnila v případě, že by uvažované investiční náklady byly vyšší, popřípadě pokud by změnila cena nakupované vlhké biomasy. I v případě dvojnásobné ceny vlhké biomasy si investice zachovává přijatelnou hodnotu doby návratnosti, konkrétně doba návratnosti vzroste o cca 77%, tedy na cca 52 měsíců (4 roky a 4 měsíce).

10 Bibliografie

- [1] HRDLIČKA, Jan. *BIOMASA – charakteristika, specifika, obecné vlastnosti*. Prezentace (studijní materiál). Praha: ČVUT Fakulta strojní, b.r.
- [2] HRDLIČKA, Jan. *BIOMASA – biomasa jako palivo pro termochemickou konverzi*. Prezentace (studijní materiál). Praha: ČVUT Fakulta strojní, b.r.
- [3] STUDNIČKOVÁ, Renata. Sušení biomasy pro energetické účely. *Biom.cz* [online]. 2017 [cit. 2018-10-14]. ISSN 1801-2655.
- [4] HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER a Dalimil ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7.
- [5] SÖHNEL, Otakar a Miroslav RICHTER. *Sušení: Výukový materiál*. Ústí nad Labem: UJEP FŽP, b.r. Dostupné také z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/12%20Suseni.pdf
- [6] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02035-5.
- [7] HAVLÍK, Jan a Tomáš DLOUHÝ. Optimalizace teplosměnné plochy kondenzátoru brýdových par ze sušení biomasy. *Energie z biomasy XVI, 16. – 18. 9. 2015* [online]. 2015 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: http://www.eu.fme.vutbr.cz/file/346_1_1
- [8] HOFFMANN, Pavel. *Výměníky tepla*. Prezentace (studijní materiál). Praha: ČVUT Fakulta strojní, b.r.
- [9] Online katalog sortimentu. *Ferona* [online]. b.r. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>
- [10] SAZIMA, Miroslav. *Tabulky sdílení tepla*. Vydání 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1973.
- [11] STUPAVSKÝ, Vladimír. Přehled cen pelet. *TZB-info* [online]. 2018 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/43-prehled-cen-pelet>
- [12] Ekover - Typy paliv. *Ekover* [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.ekover.cz/typy-paliv/>
- [13] HAVLÍK, Jan a Tomáš DLOUHÝ. Evaluation of moist biomass. *The holistic approach to environment* [online]. 2015, (52), 71-76 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.33765/thate. ISSN 1848-0071. Dostupné z: <https://hrcak.srce.hr/139332>

[14] STUPAVSKÝ, Vladimír. Přehled cen briket z biomasy. *TZB-info* [online]. 2016 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/117-prehled-cen-briket-z-biomasy>

11 Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Závislost výhřevnosti a spalného tepla paliva na obsahu vody	4
Obrázek 3-1: Rotační bubnová suška [4]	7
Obrázek 3-2: Fluidní suška [4]	8
Obrázek 3-3: Pásová suška [5]	8
Obrázek 3-4: Proudová suška [4]	9
Obrázek 3-5: Komorová suška [5]	9
Obrázek 4-1: Schéma systému bez sušení biomasy	22
Obrázek 4-2: Schéma systému se sušením biomasy	24
Obrázek 5-1: Bubnová sušárna, laboratoře Juliska	31
Obrázek 5-2: Sušený materiál	32
Obrázek 5-3: Sušený materiál	32
Obrázek 5-4: Elektrická sušárna.....	33
Obrázek 5-5: Misky se vzorky sušeného materiálu.....	33
Obrázek 5-6: Měřicí stanice pro odečet hmotnosti.....	34
Obrázek 5-7: Elektroměr pro odečet spotřeby energie.....	34
Obrázek 6-1: Segment membránové stěny.....	42
Obrázek 6-2: Navrhované rozměry segmentu pláště a segmentu lopatky.....	42
Obrázek 6-3: Průřez bubnu navrhované sušárny.....	43
Obrázek 6-4: Celkový náčrt sušárny s hlavními rozměry.....	44
Obrázek 6-5: 3D rendr navrhované sušárny biomasy	45
Obrázek 7-1: Náčrt klenutého dna DN200 [9].....	48
Obrázek 7-2: Návrh trubkovnice a uspořádání trubek v kondenzátoru.....	49
Obrázek 7-3: Návrh usměrňovací přepážky	51
Obrázek 7-4: Náčrt navrženého kondenzátoru.....	54

12 Seznam tabulek

Tabulka 4-1: Složení zadaného paliva.....	10
Tabulka 4-2: Převodní tabulka pro přepočítání paliva.....	11
Tabulka 4-3: Prvkové složení paliva pro různé vlhkosti.....	11
Tabulka 4-4: Stechiometrické poměry pro paliva různé vlhkosti.....	15
Tabulka 4-5: Ztráta mechanickým nedopalem pro různé hodnoty vlhkosti paliva.....	16
Tabulka 4-6: Ztráta chemickým nedopalem pro různé hodnoty vlhkosti paliva.....	17
Tabulka 4-7: Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků pro různé hodnoty vlhkosti paliva ...	17
Tabulka 4-8: Entalpie jednotlivých složek spalin.....	18
Tabulka 4-9: Entalpie spalin.....	19
Tabulka 4-10: Komínová ztráta pro různé hodnoty vlhkosti paliva.....	19
Tabulka 4-11: Účinnost kotle pro různé hodnoty vlhkosti paliva.....	20
Tabulka 5-1: Parametry sušky.....	31
Tabulka 5-2: Parametry jednotlivých měření.....	34
Tabulka 5-3: Výstupní data.....	35
Tabulka 6-1: Data pro návrh sušárny.....	40
Tabulka 7-1: Hmotnostní průtoky a teploty médií kondenzátoru.....	46
Tabulka 7-2: Látkové vlastnosti vody v mezitrubkovém prostoru kondenzátoru.....	50
Tabulka 7-3: Tabulka hrdel.....	53
Tabulka 8-1: Odhad hlavních komponent sušárny na základě jejich hmotnosti.....	55
Tabulka 8-2: Celková cena sušárny.....	56
Tabulka 8-3: Celková cena kondenzátoru.....	56
Tabulka 8-4: Vliv změny investičních nákladů na dobu návratnosti.....	60
Tabulka 8-6: Vliv ceny vlhké biomasy na dobu návratnosti.....	61

13 Seznam grafů

Graf 4-1: Závislost výhřevnosti paliva na obsahu vody	12
Graf 4-2: Ztráta sdílením tepla do okolí	17
Graf 4-3: Závislost komínové ztráty na vlhkosti paliva	20
Graf 4-4: Závislost účinnosti kotle na vlhkosti paliva.....	21
Graf 4-5: Spotřeba paliva pro systém bez sušení biomasy	23
Graf 4-6: Závislost celkové účinnosti systému na obsahu vody v palivu	23
Graf 4-7: Srovnání celkových účinností obou systémů.....	30
Graf 5-1: Závislost měrné spotřeby energie na teplotě otopu a objemovém zaplnění	36
Graf 5-2: Závislost měrné plošné odpařivosti na teplotě otopu a objemovém zaplnění	37
Graf 5-3: Závislost měrné objemové odpařivosti na teplotě otopu a objemovém zaplnění	38
Graf 5-4: Sušicí křivky pro různé hodnoty objemového zaplnění.....	39
Graf 5-5: Sušicí křivky pro různé teploty otopu.....	39
Graf 8-1: Cena za GJ biomasy v závislosti na její vlhkosti [12]	58
Graf 8-2: Roční úspora v palivu	58
Graf 8-3: Čistá současná hodnota investice v čase.....	59
Graf 8-4: Vliv investičních nákladů na dobu návratnosti.....	60
Graf 8-5: Vliv ceny vlhké biomasy na dobu návratnosti.....	61