

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2017

**MICHEL
SABATINI**

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh energetického zdroje se sušením biomasy** vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v přiložené bibliografii.

V Praze, dne 2. 6. 2017

.....

Podpis

Anotační list:

Jméno autora: **Michel SABATINI**

Název DP: *Návrh energetického zdroje se sušením biomasy*

Anglický název: Design of power plant with biomass drying

Rok: 2017

Studijní program: N 2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Obor studia: 3907T002 Energetika

Ústav: *Ústav energetiky*

Vedoucí BP: doc. Ing. Dlouhý Tomáš, CSc.

Konzultant:

Bibliografické údaje: Počet stran: 108
Počet obrázků: 37
Počet tabulek: 47
Počet příloh: 1

Klíčová slova: Sušení biomasy, kontaktní sušení, oběh se sušením paliva

Keywords: Biomass drying, indirect drying, cycle with fuel drying

Anotace: Cílem diplomové práce je volba a integrace sušky do parního oběhu teplárny spalující biomasu, porovnání oběhů s a bez sušky, stanovení ztráty sušky a ekonomické vyhodnocení.

Abstract: The aim of the diploma thesis is the selection and the integration of the dryer into the power plant combusting biomass steam cycle, comparison of the cycle with and without the usage of the dryer, dryer energy loss determination and economic evaluation.

Poděkování:

Rád bych zde poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Tomáši Dlouhému, CSc. za jeho rady a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky.

Obsah

Použité značení	8
Indexy	10
1) Úvod	12
2) Biomasa jako palivo	13
2.1 Obecné složení paliva	13
2.2 Biomasa a její vlastnosti	16
2.3 Sušení biomasy	18
2.4 Druhy sušek	22
2.5 Elektrárny/teplárny spalující biomasu	28
2.5.1 Energetické centrum Jindřichův Hradec	28
2.5.2 Teplárna Kehl	29
2.5.3 Elektrárna Bergkamen	30
2.5.4 Teplárna The Orléans	31
2.5.5 Teplárna Zignago	32
2.5.6 Plzeňská teplárna	33
2.6 Shrnutí kapitoly	35
3) Tepelná bilance	36
3.1 Přepočet paliva na původní stav	37
3.2 Stechiometrické výpočty	40
3.3 Účinnost kotle	44
3.3.1 Ztráta mechanickým nedopalem Z_c	46
3.3.2 Ztráta chemickým nedopalem Z_{co}	49
3.3.3 Ztráta sdílením tepla do okolí Z_{sv}	49
3.3.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f	50
3.3.5 Ztráta citelným teplem spalin (komínová) Z_k	51
3.3.6 Účinnost kotle	53

3.4 Účinnost oběhu bez sušení paliva	55
3.5 Účinnost oběhu se sušením paliva	60
3.6 Měření na experimentální sušce	66
3.7 Účinnost oběhu po zohlednění ztráty sušky	79
4) Ekonomické hodnocení.....	81
4.1 Odhad velikosti a ceny zařízení.....	81
4.2 Provozní výsledek	89
4.2.1 Cena paliva a úspora v palivu	90
4.2.2 Výkupní cena elektrické energie.....	92
4.2.3 Výnosy a náklady	95
4.3 Prostá doba návratnosti.....	97
4.4 Diskontovaná doba návratnosti	97
4.5 Citlivostní analýza	99
5) Závěr	101
Citovaná literatura	102
Seznam obrázků.....	105
Seznam tabulek.....	106
Seznam příloh	107
Přílohy.....	108

Použité značení

A	$[-]$	Popelovina
$a_{\dot{u}}$	$[-]$	Poměrný úlet popílku z ohniště
b	$[\%]$	Prémie za riziko
C	$[mil. K\check{c}/rok]$	Náklady
c	$[kJ/kgK]$	Měrná tepelná kapacita
c_{su}	$[kJ/kgK]$	Měrné teplo sušiny paliva
CF_t	$[mil. K\check{c}/rok]$	Cashflow v roce t
D	$[m]$	Průměr
D_{el}	$[mil. K\check{c}/rok]$	Rozdíl ve výnosech z vyrobené elektrické energie
E	$[MJ/kg_w]$	Energetická náročnost sušení
K_p	$[K\check{c}/kg]$	Koeficient pro přepočítání
L	$[m]$	Délka zařízení
l	$[m]$	Délka
g	$[\%]$	Míra zdražování
h	$[-]$	Hořlavina
H	$[kJ/kg]$	Adiabatický spád
i	$[kJ/kg]$	Entalpie
I	$[kJ/kg]$	Entalpie
IN	$[mil. K\check{c}]$	Investiční náklady
M	$[kg/s; kg/rok]$	Hmotnostní tok
m	$[kg]$	Hmotnost
M_p	$[t/h]$	Parní výkon
N	$[-]$	Počet
NPV	$[mil. K\check{c}]$	Čistá současná hodnota
nr	$[\%]$	Bezriziková investice
O	$[m_N^3/kg]$	Objem
o_s	$[kg/m^2 \cdot h]$	Měrná plošná odpařivost
o_v	$[kg/m^3 \cdot h]$	Měrná objemová odpařivost
P	$[K\check{c}]$	Cena
P	$[kW, MW]$	Výkon
p	$[MPa; kPa]$	Tlak

p	[Kč/GJ]	Měrná cena
Q_s	[kJ/kg]	Spálené teplo
Q_i	[kJ/kg; GJ/tuna]	Výhřevnost
R	[mil. Kč/rok]	Výnosy
r	[–]	Diskontní sazba
S	[m ²]	Plocha
s	[kJ/kgK]	Entropie
T	[min]	Doba sušení
t	[m]	Tloušťka
t	[°C]	Teplota
T_s	[rok]	Prostá doba návratnosti
U	[mil. Kč/rok]	Úspora
V	[%]	Podíl prchavé hořlaviny
V	[m ³]	Objem
$v_{stř}$	[m ³ /kg]	Střední měrný objem vody
W	[%; –]	Obsah vody
x	[%]	Suchost
y	[%]	Odchylka
Z_c	[–]	Ztráta mechanickým nedopalem
Z_{co}	[–]	Ztráta chemickým nedopalem
Z_{sv}	[–]	Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí
Z_f	[–]	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
Z_k	[–]	Ztráta citelným teplem spalin
α	[–]	Přebytek spalovacího vzduchu
η_k	[%; –]	Účinnost kotle
η_{td}	[%; –]	Účinnost termodynamická
η_m	[%; –]	Účinnost mechanická
η_g	[%; –]	Účinnost generátoru
η_{mot}	[%; –]	Účinnost elektromotoru
$\eta_{\check{c}}$	[%; –]	Účinnost čerpadla
η_{celk}	[%; –]	Účinnost oběhu celková
ρ	[kg/m ³]	Hustota
φ	[%]	Relativní vlhkost vzduchu

τ_v	[<i>hod</i>]	Doba využití zdroje
χ_v	[–]	Souč. podílu vodní páry na $1 m_N^3$ suchého vzduchu

Indexy

Dolní indexy

<i>a</i>	Admisní
<i>ad</i>	Adiabatický
<i>b</i>	Brýdách
<i>BP</i>	Brýdové páry
<i>celk</i>	Celkový
<i>e</i>	Emisní
<i>el</i>	Elektrická energie
<i>GJ</i>	Gigajoule
<i>k</i>	Za kotlem
<i>k</i>	Kondenzátu
<i>lop</i>	Lopatka
<i>mem.stěny</i>	Membránové stěny
<i>min</i>	Minimální
<i>NČ</i>	Napájecí čerpadlo
<i>NT</i>	Nízkotlaký
<i>nv</i>	Napájecí vody
<i>o</i>	Okolí
<i>o</i>	Odběrová
<i>od</i>	Odplyňovák
<i>prap</i>	Praporek
<i>p</i>	Popílku
<i>pv</i>	Palivo
<i>r</i>	Roštový propad
<i>red</i>	Redukovaná
<i>rot</i>	Rotor
<i>S</i>	Spaliny
<i>s</i>	Sytých par

<i>s</i>	Škváře
<i>seg</i>	Segment
<i>SS</i>	Spaliny suché
<i>sušky</i>	Sušky
<i>SV</i>	Spaliny vlhké
<i>sv</i>	Svorkový
<i>t</i>	Rok
<i>teor</i>	Teoretický
<i>tr</i>	Trubka
<i>ú</i>	Úletu
<i>V</i>	Vzduch
<i>VS</i>	Vzduch suchý
<i>Vl, Sp</i>	Po vlastní spotřebě
<i>VT</i>	Vysokotlaký
<i>VV</i>	Vzduch vlhký
<i>vz</i>	Vzduch
<i>w</i>	Voda
<i>1</i>	Vstup
<i>2</i>	Výstup

Horní indexy

<i>bs</i>	Bez sušky
<i>d</i>	Stav bez vody
<i>daf</i>	Stav bez vody a popela
<i>r</i>	Původní stav
<i>r₃</i>	3. recirkulace
<i>ss</i>	Se suškou
<i>ssz</i>	Se suškou a po zohlednění ztráty sušky
<i>t</i>	Teplota
<i>V</i>	Objem
<i>xx%</i>	Obsah vody xx% v palivu

1) Úvod

Předmětem této závěrečné práce je integrace sušky do technologie parní teplárny spalující mokrou biomasu a následné vyhodnocení jejich technických a ekonomických přínosů. Práce je rozdělena do třech hlavních kapitol.

První z nich je rešeršního charakteru a jejím cílem je seznámení se s terminologií používanou pro popis paliva a sušení. Kapitola představuje základní vlastnosti paliva, specifika biomasy a též základy teorie sušení. Jedna z podkapitol se zaměřuje na různé druhy sušek s cílem vybrat vhodné zařízení pro parní teplárnu. Závěr této kapitoly je věnován popisu několika existujících energetických zdrojů spalujících biomasu za účelem výběru vhodných parametrů tepelného oběhu.

Cílem druhé kapitoly je zjistit, zda integrace sušky vede ke zvýšení tepelné účinnosti oběhu a získat data umožňující odhad investičních a provozních nákladů. Kapitola obsahuje přepočet zadaného paliva na původní stav, stechiometrické výpočty a výpočet účinnosti kotle pro různé vstupní obsahy vody v palivu s podrobným stanovením jednotlivých ztrát. Dále kapitola navrhuje tepelný oběh s a bez sušky a vyhodnocuje přínos sušky. Součástí kapitoly je i měření na experimentální sušce v laboratořích ČVUT, jeho vyhodnocení a stanovení měrných odpařivostí pro základní návrh sušky.

V poslední kapitole je na základě dat získaných z měření proveden základní návrh zařízení s cílem odhadnout jeho velikost. Odhad velikosti zařízení umožní stanovit investiční náklady. Ze znalosti cen paliva, účinností oběhu s a bez sušky a energetické náročnosti sušení je možno k definovanému kotli tyto oběhy přiřadit a stanovit provozní náklady. Závěr kapitoly se věnuje ekonomickému vyhodnocení vlivu sušky na ekonomiku parní teplárny.

2) Biomasa jako palivo

Tato kapitola popisuje obecné složení paliva a také konkrétní složení jednotlivých druhů biomasy a jejich vlastnostem při spalování. V neposlední řadě kapitola uvádí také důvody a způsoby sušení biomasy.

2.1 Obecné složení paliva

Tato podkapitola zpracovává zdroje [1], [2], [3], [4].

Palivo je látka, která hoří a při tomto procesu uvolňuje teplo, které využíváme pro další potřeby. Charakteristickým parametrem paliva je jeho spálené teplo, evt. jeho výhřevnost. Spálené teplo Q_s [$\frac{kJ}{kg}$] je množství tepla, které se uvolní při dokonalém spálení 1 kg paliva a následným ochlazením produktů spalování na 20 °C, přičemž se předpokládá, že vodní pára ze spalin zkondenzuje. Výhřevnost Q_i [$\frac{kJ}{kg}$] je množství tepla, které se uvolní při dokonalém spálení 1 kg paliva a následným ochlazením produktů spalování na 20 °C, přičemž se předpokládá, že vodní pára ze spalin nezkondenzuje. Je tedy vidět, že jediný rozdíl mezi výhřevností a spáleným teplem je v kondenzačním teple vody. Toto je dáno vztahem

$$Q_i = Q_s - 2453(W + 8,94H) \left[\frac{kJ}{kg} \right]. \quad (2.1)$$

Spálené teplo se určí laboratorně v kalorimetrické bombě, protože voda vždy zkondenzuje. Výhřevnost se musí dopočítat. V praxi se používají tyto vzorce:

- **Du Longův vzorec vhodný silně prouhelnatělá uhlí (černé uhlí, antracit)**

$$Q_i^r = 33,91C^r + 121,42H^r - 15,18O^r + 10,47S^r - 2,43W^r \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (2.2)$$

- **Vondráčkův vzorec doporučovaný pro mladší paliva (hnědé uhlí, lignit)**

$$Q_i^r = (37,14 - 2,58C^{daf})C^r + 90,88H^r - 11,26O^r + 10,47S^r - 2,45W^r \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (2.3)$$

- **Statistický vzorec pro všechna tuhá paliva od koxu až po dřevo**

$$Q_i^r = 34,75C^r + 95,3H^r - 10,9(O^r - S^r) - 2,5W^r \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (2.4)$$

Palivo se obecně skládá ze tří složek, kterými jsou hořlavina (h), popelovina (A) a voda (W). Složení můžeme zapsat ve tvaru

$$h + A + W = 1 [-]. \quad (2.5)$$

Při stanovování jednotlivých složek se používají definované stavy, z nichž jsou nejdůležitější tyto:

- původní stav, kde jsou obsaženy všechny 3 složky – označení r (real),
- stav bez vody – označení d (dry),
- stav bez vody a popela – označení daf (dry – ashfree).

Hořlavina je nejvýznamnější složkou paliva, protože je nositelem energie. Prvkové složení hořlaviny je možné zapsat ve tvaru

$$C^{daf} + H^{daf} + S^{daf} + O^{daf} + N^{daf} = h^{daf}, \quad (2.6)$$

toto složení je dále možné rozdělit na prvky aktivní (C, H a S) – ty jsou nositeli chemicky vázané energie, která se při jejich spalování uvolňuje – a prvky pasivní (O a N), které nepřinášejí žádnou energetickou hodnotu.

Dále je možné hořlavinu rozdělit na prchavou s označením V – jde o plynnou látku, která se začíná uvolňovat při nižších teplotách cca od 200°C–300 °C – a tuhý zbytek (koks) tvořený prakticky čistým uhlíkem. Podíl prchavé hořlaviny je závislý na stáří paliva. Obecně lze říci, že čím starší palivo (geologicky), tím méně prchavé hořlaviny a více uhlíku.

Palivo	V^{daf} [%]
Koks	0 až 5
Antracit	5 až 10
Černé uhlí	10 až 45
Hnědé uhlí	45 až 60
Rašelina	60 až 73
Dřevo	73 až 88

Tabulka 1 Podíl prchavé hořlaviny [1]

Další složkou paliva je popelovina (A), což je směs chemicky vázaných minerálů, jakými jsou například jílové minerály, karbonáty, sulfidy, sulfáty, oxidy a halogenní minerály. Během spalování probíhají v popelovině chemické reakce a vzniká popel. Při spalování se popeloviny mění, dochází například ke kalcinaci uhličitánů, při níž se odštěpuje CO_2 ; pražení pyritů, při kterém se odštěpuje SO_2 ; odpařování hydrátové vody, což jsou produkty shodné s produkty spalování hořlaviny; a tudíž popeloviny se hmotnostně nerovnjí popelu. Popelovina je tedy balastní složkou paliva, která snižuje výhřevnost, navíc vzniklý popel je třeba odvádět ze spalovacího prostoru a dále jej likvidovat. Biomasa má relativně nízký podíl popeloviny, například dřevo okolo 1 %, v porovnání s uhlím, které může mít až okolo 30 %.

Poslední složkou v palivu je voda. Řadí se též mezi balastní složky paliva, avšak pro jeho dobré hoření není žádoucí, aby v něm nebyla žádná. Voda je v palivu vázána několika způsoby:

- **Přimíšená voda**
 - Lze jí odstranit mechanickým způsobem (odkapávání, odstředěním).
 - Není považována za část původního paliva.
- **Hrubá voda**
 - Pro její stanovení je třeba nechat palivo sušit při pokojové teplotě a relativní vlhkosti asi 50 %. Určení hrubé vody poté proběhne z rozdílu hmotností před a po sušení.
- **Zbylá voda**
 - Je kapilárně vázaná v palivu a zůstává i po odstranění hrubé vody.
 - Stanovení se provádí z úbytku hmotnosti laboratorního vzorku sušením ve vzdušné sušce při teplotě 105 až 110 °C.
- **Veškerá voda**
 - Jde o součet hrubé a zbylé vody.
- **Okludovaná voda**
 - Jedná se o velmi malé množství vody adsorbované na hořlavinu, které se řadí mezi prchavou hořlavinu.
- **Hydrátová voda**
 - Je to krystalová voda minerálů, která se řadí k popelovinám.

2.2 Biomasa a její vlastnosti

Podkapitola je věnována tomu, co je a co není biomasa, jejím vlastnostem, složení hořlaviny, obsahu vody a s tím i související hranici spalitelnosti. Podkapitola čerpá z [5], [6], [7].

Biomasa je veškerý materiál organického původu, tj. obsahující uhlovodíky. Této definici by odpovídalo například i uhlí či ropa, proto je nutné zavést ohraničení. Za biomasu je považován materiál mladší než rašelina (II. stupeň uhelnatění). Rašelina a geologicky starší paliva jsou považována za fosilní. Jmenovitě bychom mezi biomasu zařadili například fytomasu a zoomasu, zbytky a produkty jejich existence, produkty technologických přeměn z organických materiálů a odumřelou, ne však fosilní, fytomasu a zoomasu. Následující tabulka porovnává vybrané druhy biomasy.

Palivo	Rozmezí	Výhřevnost [MJ/kg]	Podíl prchavé hořlaviny [%]	Obsah popelovin [%]	Vlhkost [%]	Elementární složení				
						C	H	O	N	S
						[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Obilná sláma	min	15	70	3,5	12	43,9	5,4	38	0,3	0,05
	max	17,5	82	6,5	25	48	6,4	43,3	0,7	0,2
Obiloviny sláma + zrno	min	15,5	76	3	12	45	6	39,5	1	0,09
	max	18,5	79	5,6	25	49	6,4	41,3	1,7	0,3
Miscantus sloní tráva	min	15	74	2,5	12	45	5,5	36	0,5	0,05
	max	17,6	79	8	40	49	6,4	41,3	1,7	0,3
Seno	min	13,5	70	4,2	15	45	5,3	41,4	0,1	0,02
	max	17,7	75	5,8	25	48,6	6,6	44,3	1,1	1,12
Dřevo	min	16,9	70	0,2	10	45	5,3	41,4	0,1	0,02
	max	19	85	3	60	52	6,5	46	1,7	0,3
Hnědé uhlí	min	14	20	3	10	27,5	2,5	12	0,3	0,5
	max	23	55	33	30	64	5,8	33	1,5	6

Tabulka 2 Porovnání různých druhů biomasy a hnědého uhlí [5]

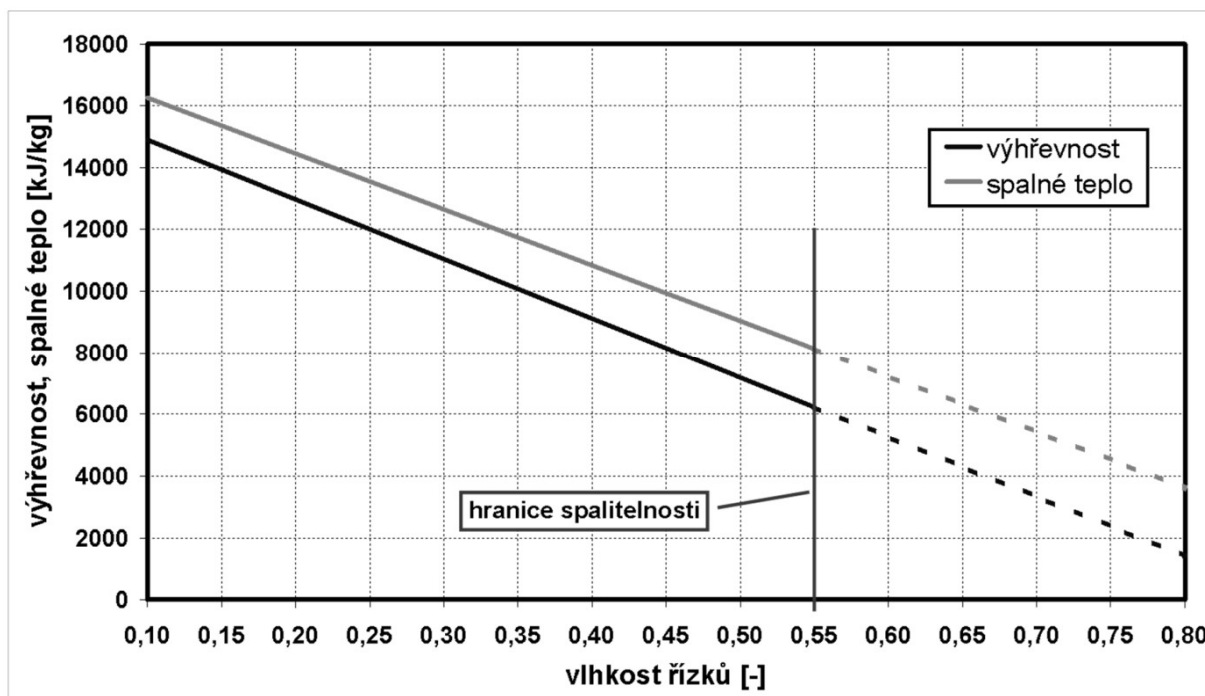
Výhřevnost suché biomasy je relativně vysoká. Listnaté stromy mají výhřevnost okolo 18 MJ/kg a jehličnaté stromy dokonce hodnoty okolo 19 MJ/kg. Podobné hodnoty výhřevnosti mají i další druhy biomasy, například sláma obilovin a traviny. Tyto se svými hodnotami blíží výhřevnosti průměrného hnědého uhlí. Biomasa vždy obsahuje určitý podíl vody, nejméně okolo 10 %, přičemž průměrný obsah vody skladovaného dřeva a štěpky pod střechou s větráním je okolo 30 %. Obsah vody u balíkové slámy skladované v halách je okolo 14–16 %. Při spalování dochází k odpařování této vody, a tím i snižování výhřevnosti v důsledku velkého výparného tepla vody. Výhřevnost

paliva není v čase konstantní, ale v důsledku působení mikroorganismů, včetně plísní a hub, se snižuje. Dále pak kvůli vysokému obsahu vody rostou i náklady na dopravu a skladování biomasy.

Obsah vody	Palivo			
	Dřevo		Kůra	
	[MJ/kg]	[kWh/kg]	[MJ/kg]	[kWh/kg]
0	18,5	5,1	18,8	5,2
10	16,4	4,6	16,7	4,6
20	14,3	4	14,6	4,1
30	12,2	3,4	12,5	3,5
40	10,1	2,8	10,5	2,9
50	8	2,2	8,4	2,3
60	6	1,7	6,3	1,8

Tabulka 3 Výhřevnost pro různé obsahy vody [5]

Některé druhy biomasy mají velice vysoký obsah vody a není možné je spalovat přímo. Za hranici spalitelnosti je považován obsah vody okolo 55 %. V případech, kdy je obsah vody vyšší a je požadavek na použití daného paliva, je třeba jej nejprve vysušit.



Obrázek 1 Výhřevnost a spalné teplo v závislosti na vlhkosti řízků [7]

2.3 Sušení biomasy

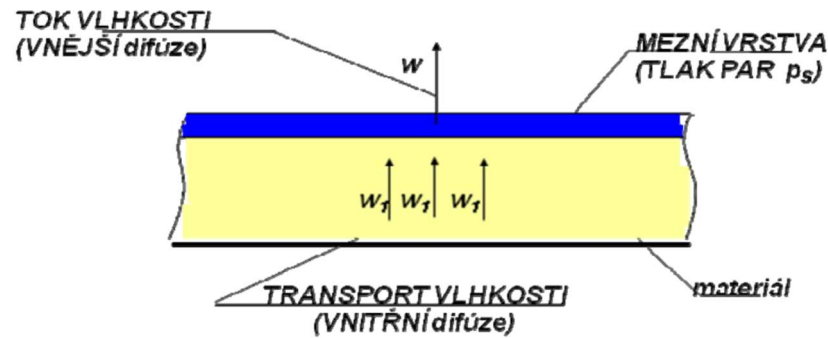
Z hrubého rozboru paliva je zřejmé, že nejjednodušším způsobem zvyšování výhřevnosti mokrého paliva je jeho sušení. V této podkapitole je důkladně rozebrán princip a průběh sušení. Tato podkapitola zpracovává [8] a [9].

Sušením rozumíme jakékoliv odpařování vody či jiné kapaliny z materiálu a následný přestup vypařené páry do okolí. K odpaření kapaliny je třeba materiálu dodat energii. Podle způsobu přívodu energie rozeznáváme kontaktní, mikrovlnné, radiační a konvekční způsoby sušení.

- **Kontaktní sušení** – sušenému materiálu se dodává teplo vedením z vyhřívané plochy, tu může tvořit například svazek kovových trubek nebo kovový plášť nádoby. Tyto sušky pracují zpravidla při nízkých tlacích, což umožňuje zrychlit proces sušení a pracovat při nízkých teplotách.
- **Mikrovlnné sušení** – energie je předávána látkám s nesymetrickou molekulární strukturou (s dipólovým momentem) prostřednictvím radiových vln o frekvenci 915 nebo 2450 MHz, přičemž orientační polarizace je doprovázena vznikem tepla, které způsobuje odpařování vlhkosti.
- **Radiační sušení** – povrch materiálu je zahříván infračerveným zářením o vlnové délce 1–2 μm . Sušky využívající tento způsob jsou vhodné k dosušování.
- **Konvekční sušení** – teplo je přiváděno k sušenému materiálu prostřednictvím sušicího plynu (horký vzduch, horké spaliny). Sušený materiál a sušící plyn jsou ve styku. Jedná se o nejběžnější způsob sušení.

Princip sušení:

Sušení je proces, při kterém je přiváděno teplo do sušeného materiálu a vlivem tohoto tepla dochází k odpařování (difuzi) vlhkosti z povrchu materiálu. Uvnitř materiálu probíhá difuze vlhkosti směrem od středu materiálu k povrchu, přičemž vzniklé páry je třeba odvádět. Průběh sušení je určen zejména odporem difuze odstraňované kapaliny. Difuzní děj je samovolný přenos vlhkosti pohybem molekul z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s nižší koncentrací.



Obrázek 2 Schéma přenosu hmoty při sušení [8]

Na povrchu sušeného materiálu se vytváří mezní vrstva. Tato mezní vrstva je tvořená vodní parou a dle vnitřních a vnějších podmínek dosáhne tlaku p_s , zatímco okolní prostředí obsahuje páry o tlaku p_o , a mohou tedy nastat různé kombinace:

- $p_s > p_o$ – při tomto stavu nastává tok vlhkosti z mezní vrstvy do okolí a dochází k sušení materiálu.
- $p_s < p_o$ – při tomto stavu nastává tok vlhkosti z okolí do materiálu a dochází k vlhčení materiálu.
- $p_s = p_o$ – při tomto stavu je dosaženo rovnovážné vlhkosti.

Pro správný proces sušení je nezbytné, aby mezní vrstva byla stále sycena vlhkostí materiálu. Pro rychlost sušení je pak limitní nižší z rychlostí difuze vlhkosti uvnitř materiálu nebo difuze vlhkosti do okolí.

Vazba vlhkosti ve hmotě:

Vlhkost v materiálu může být vázaná různými způsoby. Pro odstranění vlhkosti je třeba tyto vazby porušit. Pro porušení vazby je třeba energie, kterou do procesu sušení musíme přivést. Jednotlivé typy vazeb jsou:

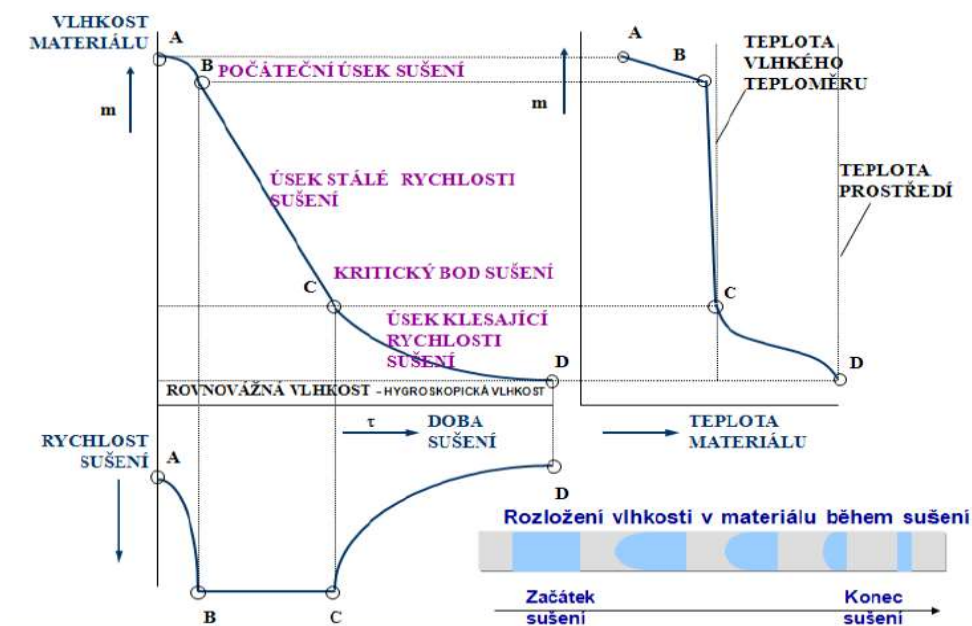
- hydratační – chemicky vázaná, součást molekul, její odstranění je nevratný děj,
- kapilární – vyplňuje kapilární prostory, její odstranění má za následek změnu vlastností materiálu (pružnost, tažnost, plasticitu),
- adsorbovaná – vyplňuje velké mezivláknité prostory.

Způsoby odstranění vlhkosti:

- Mechanické – jsou vhodné pro částečné odstranění vlhkosti materiálu. Patří mezi ně například lisování, vysávání, filtrování a odstředování.
- Fyzikálně chemické – pro odstranění vlhkosti z materiálu je použita hygrokopická látka. Tyto metody jsou poměrně drahé. Jejich využití je zejména pro sušení plynů.
- Tepelné – jsou vhodné pro aplikace, kde je třeba odstranit téměř veškerou vlhkost. Teplo, které je přiváděno do materiálu, způsobí vypařování, odpařování, a tím odvod vlhkosti, která následně zkondenzuje mimo materiál.
- Vymrazování (sublimace) – principem vymrazování je zchlazení na velice nízkou teplotu, kdy dojde ke změně skupenství vody na led. Poté dochází k odstranění vlhkosti ve formě ledových krystalů sublimací.

Průběh sušení:

Průběh sušení zobrazuje sušicí křivka, která je základní charakteristikou sušicího procesu. Vyjadřuje časovou změnu vlhkosti v materiálu. Pomocí vzorků o známé hmotnosti zjišťujeme po určitých časových intervalech úbytky vlhkosti. Na základě těchto dat je možné sestavit tuto křivku. Z hlediska kinetiky je důležitý diagram rychlosti sušení.



Obrázek 3 Průběh sušení (průběhy vlhkosti, teploty a rychlosti sušení) [8]

Z obrázku je patrné, že průběh sušení lze rozdělit na tři úseky. Tyto úseky zahrnují počáteční fázi A–B, ustálený úsek sušení B–C a závěrečnou fázi s klesající rychlostí sušení C–D.

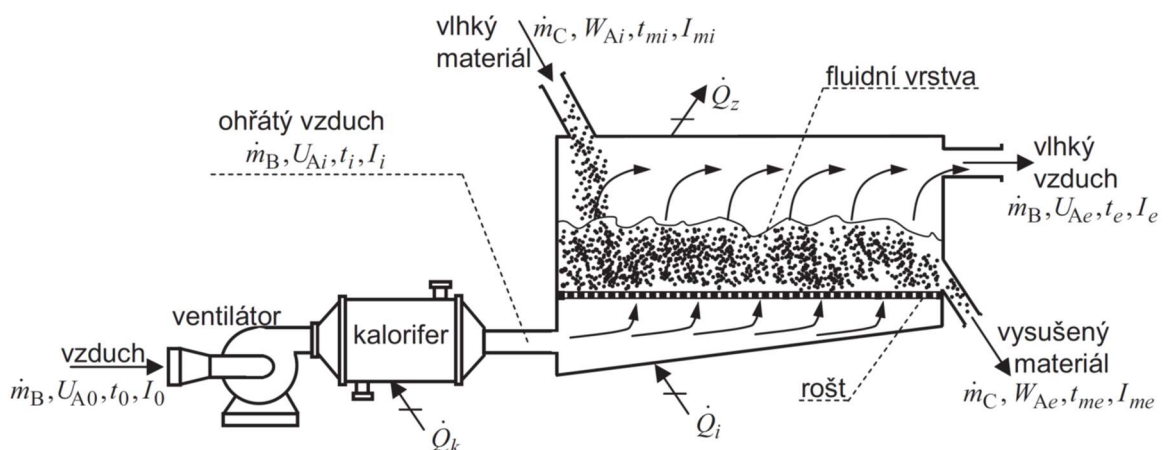
- **Úsek A–B** – V okamžiku vzniku teplotního gradientu se začne materiál ohřívat z počáteční teploty t_p , zároveň se odpařuje vlhkost z povrchu, protože existuje gradient koncentrací vlhkosti na styku materiálu a vzduchu. Vlhkost materiálu klesá z bodu A do bodu B a proces ohřívání materiálu se zpomaluje v důsledku velkého výparného tepla vody, které je odebíráno sušicímu médiu. Tento úsek je relativně krátký.
- **Úsek B–C** – V tomto úseku dosáhl sušený materiál teploty adiabatického nasycení t_a , tj. přibližně teplota vlhkého teploměru t_w . Teplota materiálu se už nemění a veškeré teplo, které je přivedeno, způsobí odpaření nevázané vody z částice. Množství tepla předané za jednotku času je přímo úměrné rozdílu teplot mezi sušicím vzduchem a povrchem materiálu a součinitelem přestupu tepla. Jak bylo zmíněno, teplota se nemění, a tedy všechny parametry jsou konstantní, proto i tok tepla mezi vzduchem a částicí je konstantní. Obdobné platí i pro tok hmoty, kdy součinitel přestupu hmoty a rozdíly koncentrací vodní páry ve vzduchu a na povrchu materiálu jsou konstantní, a proto i tok hmoty je konstantní. Tento stav trvá až do bodu C, kdy se povrch materiálu vysuší, nikoliv však celý materiál.
- **Úsek C–D** – V bodě C přestane být povrch částice mokrá a proces sušení se začne zpomalovat, protože pára musí nejprve nedifundovat zevnitř částice k povrchu. Částice se začne ohřívat nad teplotu vlhkého teploměru, což způsobí snížení rozdílu teplot mezi sušicím vzduchem a povrchem sušené částice, a v důsledku toho se sníží i tepelný tok. Oba děje se zpomalují a částici tedy není možné vysušit více než na rovnovážnou vlhkost, při které se teplota částice dostane na teplotu sušicího vzduchu. Dosažení rovnovážné vlhkosti by mělo trvat nekonečně dlouho, a proto je na obrázku zobrazen bod D pouze blízko rovnovážné vlhkosti. Při dosažení rovnovážné vlhkosti nedochází k výměně tepla ani hmoty mezi vzorkem a okolím, parciální tlaky páry v materiálu a parciální tlaky v okolí jsou taktéž v rovnováze.

2.4 Druhy sušek

Podkapitola je věnována suškám a principům jejich funkce. Existuje nepřehledné množství materiálů k sušení, a tedy i způsobů, jak tyto materiály sušit. Cílem je popsat několik typů sušek, které jsou používány k sušení. Podkapitola vychází z [9].

Kontinuální fluidační suška

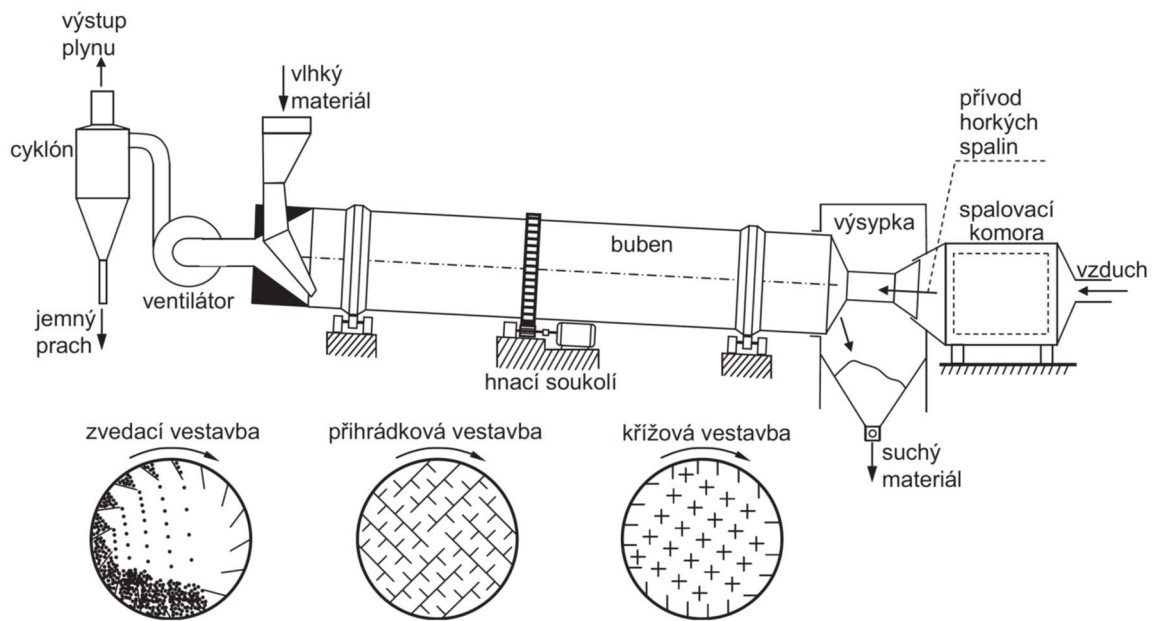
V kontinuální fluidační sušce je sušený materiál přiváděn do fluidní vrstvy, kde dochází k přenosu hmoty (vlhkosti) ze sušeného materiálu do proudícího vzduchu. Sušený materiál a vlhký vzduch je pak odváděn dle schématu (obrázek 5). Fluidační sušky se vyrábí v různých konfiguracích, hlavní rozdíly jsou pak v druhu fluidní vrstvy. Tyto sušky mohou být jak jednostupňové, tak i vícestupňové. Jsou vhodné pro sušení materiálů se stejnou granulometrií. Využívají se zejména pro sušení chemikálií, obilí a cukru.



Obrázek 4 Kontinuální fluidační suška [9]

Rotační bubnová suška

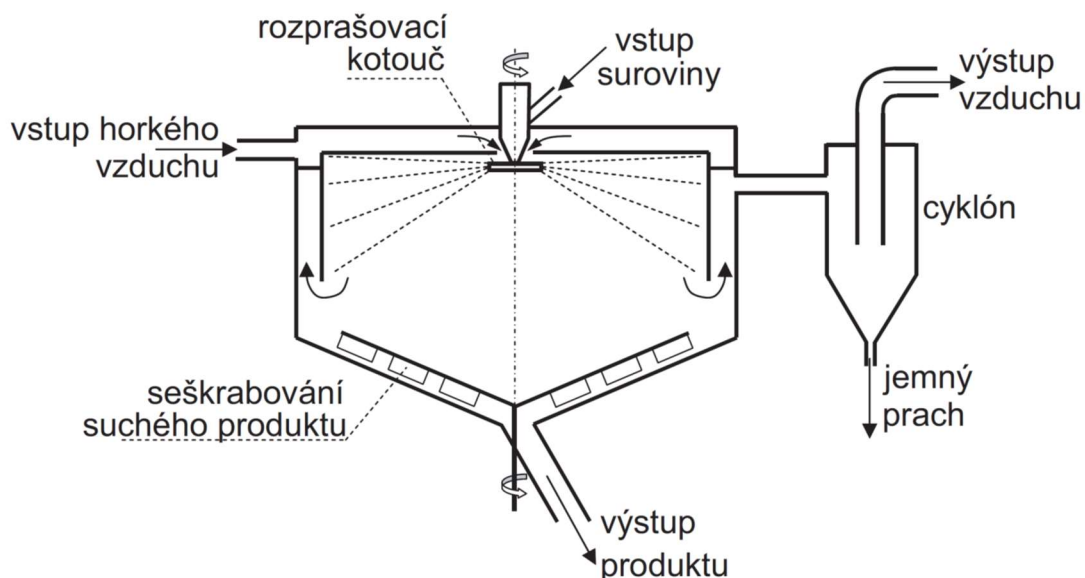
Jedná se o kontinuální sušku skládající se z pomalu otáčejícího se bubnu s průměrem okolo 2 až 3 m. Buben je z důvodu posouvání sušeného materiálu ve směru k výsypce lehce nakloněný. Sušený materiál se postupně posunuje a je sušen prostřednictvím sušícího plynu. Sušící plyn může být například vzduch anebo spaliny. Metoda je vhodná i pro polydisperzní materiály vyžadující delší dobu sušení.



Obrázek 5 Rotační bubnová suška a tři ukázky vestavby bubnu [9]

Rozprašovací suška

Rozprašovací suška je válcová nádoba s kuželovým dnem. Sušený materiál nebo jeho suspenze je rozprašována pomocí rozprašovacího kotouče. Rozprašené kapičky jsou malé, mají velkou rychlost a po odpaření vlhkosti z nich vzniká prášek. Prášek je odváděn ze dna. Suška je vhodná pro sušení sypkých materiálů nebo pro sušení suspenzí typu prací prášek, mléko, vejce, kakao, káva, škrob a jiné. Sušení probíhá rychle a je vhodné pro sušení látek citlivých na teplo.



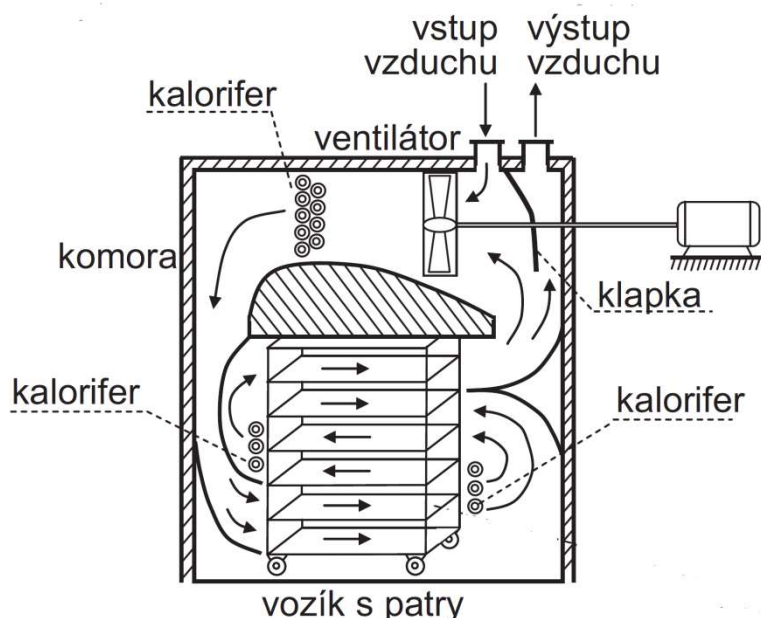
Obrázek 6 Rozprašovací suška [9]

Mikrovlnné sušky

Technologie mikrovlnného ohřevu probíhá při frekvencích 915 nebo 2450 MHz. Je vhodná pro materiály citlivé na mechanické namáhání a teplotu. Používá se například pro sušení ovoce, protože při vakuovém mikrovlnném sušení si ovoce zachová chuť i barvu. Metoda je dále vhodná pro materiály s buněčnou strukturou, jako je například dřevo. Sušení je vhodné pro materiály s nižším obsahem vody.

Komorová suška

Jedná se o vsádkovou sušárnu, tzn. sušený materiál se naveze do sušky, zde se suší a nepřivádí se žádný další sušený materiál. Po vysušení se již vysušený materiál vyveze ven a proces se opakuje. Sušení probíhá na lískách, které umožňují průchod sušícího plynu, nebo na deskách, kde sušící plyn podélně obtéká sušený materiál. Uvnitř komory se nachází kalorifery, což mohou být výměníky tepla vyhřívané parou, přes které protéká ventilátorem hnaný vzduch do sušící komory. Tyto sušky jsou vhodné pro sušení materiálů s vysokým vnitřním difuzním odporem, jako je ovoce či maso.



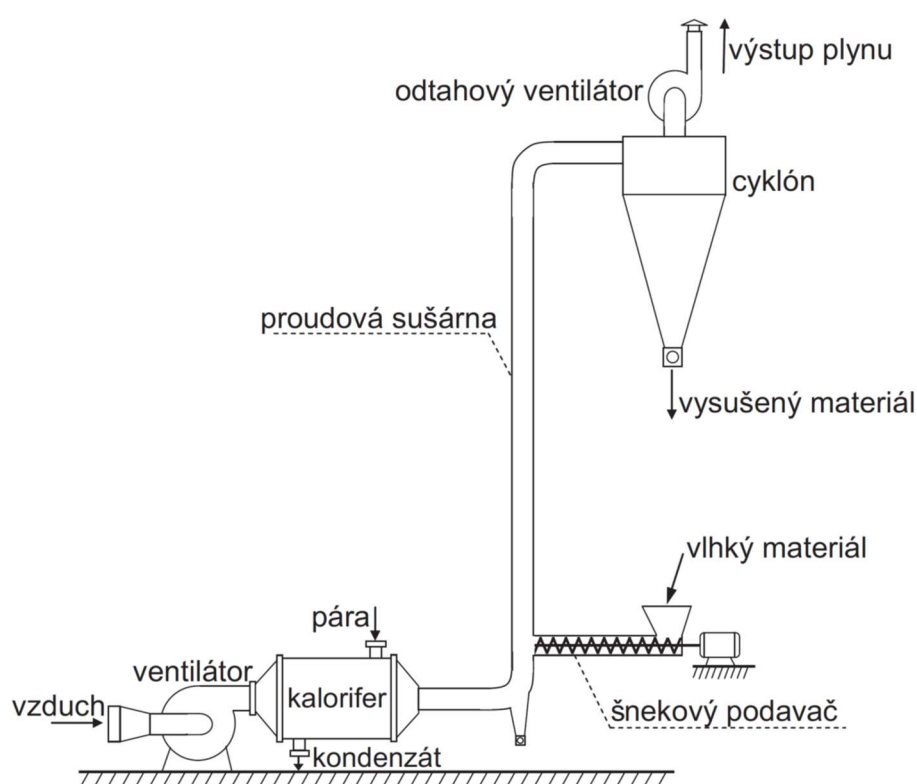
Obrázek 7 Komorová vsádková suška [9]

Sušky využívající infračervené záření

U tohoto typu sušky je záření emitováno odporově vyhřívanými topnými tělisky nebo porézními keramickými tělisky. Na těchto těliscích probíhá katalytické spalování plynu. Toto záření způsobuje povrchový ohřev sušeného materiálu, a je tedy vhodným způsobem pro sušení papíru, nátěrů automobilů apod.

Proudová pneumatická suška

Jedná se o souproutou sušárnu, kde je sušený materiál dávkován pomocí šnekového dopravníku do proudu horkého vzduchu, který jej současně suší a unáší směrem k cyklonu. V cyklonu se odděluje suchý materiál, který vystupuje dolní částí, a vlhký vzduch, který je odváděn ventilátorem do ovzduší. Metoda je vhodná pro sušení drobných částic, které vyžadují pouze několikasekundový styk mezi sušeným materiálem a sušicím plynem. Využití je při sušení povrchové vlhkosti krystalů nebo neporézních materiálů, jako jsou škrob, kvasinky, částice polymerů apod.



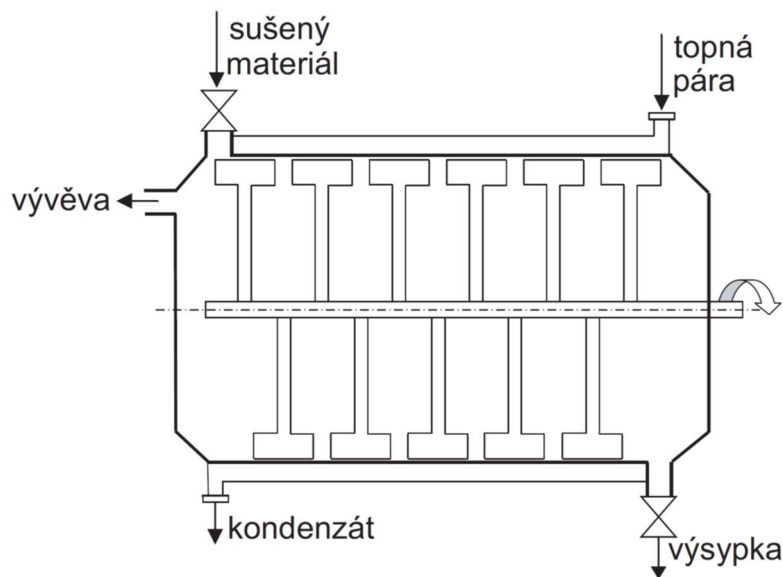
Obrázek 8 Proudová pneumatická suška [9]

Sublimační (lyofilizační) kontaktní sušky

V této sušce je sušený materiál nejprve prudce zmražen, takže se na povrchu materiálu objeví malé krystaly ledu, které nepoškozují strukturu materiálu. Sublimace je realizována při tlaku 100 Pa a teplo je přiváděno k materiálu přes kontaktní plochu, přičemž při přívodu nesmí dojít k překročení teploty tání ledu. Toto sušení je energeticky náročné a používá se při extrémních nárocích na kvalitu, např. krevní plasma.

Kontaktní suška

V kontaktní sušce je teplo přiváděno sušenému materiálu prostřednictvím kontaktní plochy. K přenosu tepla dochází tedy vedením. Pro vyhřívání kontaktní plochy je možné využít topnou páru, která v sušce kondenzuje a předává své kondenzační teplo. Vlhký vzduch musí být z prostoru sušky odváděn. Jako příklad je uvedena jedna z variant kontaktních sušáren, tj. lopatková suška (obrázek 9).



Obrázek 9 Lopatková suška [9]

Výběr druhu sušky

Volím kontaktní sušku z toho důvodu, že pro vytápění je možné využít odběrovou páru z turbíny. Tato pára již vykonala práci na turbíně, avšak má stále velké množství kondenzačního tepla, které by jinak bylo zmařeno v kondenzátoru. Toto teplo je možné využít pro sušení, podobně jako lze tuto páru využít pro ohřev napájecí vody v regeneračním ohříváku. Tento způsob by tedy měl vést ke zvýšení účinnosti celého oběhu. Ostatní druhy sušek by pro svůj chod potřebovaly jiný zdroj energie (spaliny, horký vzduch, elektrická energie), který by vedl ke snížení účinnosti oběhu.

2.5 Elektrárny/teplárny spalující biomasu

V této podkapitole je popsáno několik elektráren nebo tepláren spalujících biomasu se zaměřením na jejich parametry. Tato kapitola poslouží jako podklad pro teoretické výpočty.

2.5.1 Energetické centrum Jindřichův Hradec

Původně se jednalo o energetické centrum pro textilní podnik Jitka. Je zde vybudován čistě biomasový kotel, ve strojovně je instalována odběrová turbína s kondenzací. Chladicí voda je zde ochlazována v chladicí věži s přirozeným tahem. Pro palivo rostlinného původu byla postavena uzavřená hala na cca tří denní zásobu paliva. Jako palivo slouží balíky slámy nebo sena a cíleně pěstované energetické rostliny. Palivo je sváženo z okruhu cca 70 km vlastní dopravou. Energetické centrum ročně vyrobí přibližně 28 GWh elektrické energie a 120 000 GJ. [10].

Parametry:

Výkon kotle [t/h]	Admisní tlak [MPa]	Admisní teplota [°C]	Výkon tepelný [MW]	Výkon elektrický [MW]
25	4	400	105	5,6

Tabulka 4 Energetické centrum Jindřichův Hradec [10]



Obrázek 10 Energetické centrum Jindřichův Hradec [11]

2.5.2 Teplárna Kehl

Tato teplárna v Německu dodává páru pro místní papírnu a elektrickou energii do sítě v rámci zákona o obnovitelných zdrojích. Teplárna je vybavena fluidním kotlem s cirkulující fluidní vrstvou. Jako palivo slouží dřevní odpad, jehož spotřeba je přibližně 110 000 t/rok. [12] a [13]

Parametry:

Výkon kotle [t/h]	Admisní tlak [MPa]	Admisní teplota [°C]	Výkon tepelný [MW]	Výkon elektrický [MW]
59	9	500	35	8,9

Tabulka 5 Teplárna Kehl [12]



Obrázek 11 Teplárna Kehl [14]

2.5.3 Elektrárna Bergkamen

Tato německá elektrárna dodává elektrickou energii do sítě v souladu se zákonem o obnovitelných zdrojích. Elektrárna je vybavena fluidním kotlem s cirkulující fluidní vrstvou. Jako palivo se používá dřevní odpad, jehož spotřeba je přibližně 140 000 t/rok. [12] a [15]

Parametry:

Výkon kotle [t/h]	Admisní tlak [MPa]	Admisní teplota [°C]	Výkon tepelný [MW]	Výkon elektrický [MW]
80	9	500	-	20

Tabulka 6 Elektrárna Bergkamen [12]



Obrázek 12 Elektrárna Bergkamen [15]

2.5.4 Teplárna The Orléans

Teplárna z roku 2015 zásobuje teplem 15 000 domovů v severní části Orléans ve Francii, což odpovídá přibližně 27 %. Jako palivo slouží dřevo, piliny nebo čisté recyklované dřevo. Tato teplárna spotřebuje 110 000 t/rok paliva, které je sváženo z okruhu 150 km. [16]

Parametry:

Výkon kotle [t/h]	Admisní tlak [MPa]	Admisní teplota [°C]	Výkon tepelný [MW]	Výkon elektrický [MW]
neuveveno	12	525	25	8

Tabulka 7 Teplárna The Orléans [16]



Obrázek 13 Teplárna The Orléans [17]

2.5.5 Teplárna Zignago

Teplárna Zignago je rodinná teplárna v Itálii. Vyznačuje se velkou flexibilitou ve spalování různých paliv. V teplárně je možné spalovat dřevo, piliny, všechny možné druhy slámy, kukuřičné zrno, ovocné pecky, ale i cíleně pěstovanou biomasu. [18]

Parametry:

Výkon kotle [t/h]	Admisní tlak [MPa]	Admisní teplota [°C]	Výkon tepelný [MW]	Výkon elektrický [MW]
neuveveno	9,2	522	4,5	17,9

Tabulka 8 Teplárna Zignago [18]



Obrázek 14 Teplárna Zignago [19]

2.5.6 Plzeňská teplárna

Jedná se o největší kogenerační zdroj na biomasu v České republice s elektrickým výkonem $11,5 \text{ MW}_e$ a tepelným výkonem 35 MW_t pro vytápění města. Teplárna uspoří přibližně 200 000 t/rok uhlí. Jako palivo slouží zbytková hmota z těžby dřeva, dřevní hmota z údržby soukromé i veřejné zeleně, cíleně pěstované plodiny a dřeviny a také biopaliva z nich vyrobená. [20] a [21]

Parametry:

Výkon kotle [t/h]	Admisní tlak [MPa]	Admisní teplota [°C]	Výkon tepelný [MW]	Výkon elektrický [MW]
45	6,7	490	35	11,5

Tabulka 9 Plzeňská teplárna [20] a [21]



Obrázek 15 Teplárna v Plzni [22]

Volba parametrů

V tabulce 10 je porovnání několika možností admisních parametrů a výsledné suchosti před kondenzací. Emisní teplota byla zvolena $t_e = 45 \text{ °C}$ a termodynamická účinnost turbíny $\eta_{td} = 84 \%$. Znalost emisní teploty a termodynamické účinnosti umožnila stanovit všechny entropie a entalpie a dopočítat koncovou suchost páry před kondenzací. Vzhledem k tomu, že emisní teplota je volena, je třeba zkontrolovat, zda suchost páry není příliš nízká. Parametry jsou vypočteny pomocí programu SteamProperty.

p_a [MPa]	t_a [°C]	i_a [kJ/kg]	s_a [kJ/kgK]	t_e [°C]	p_e [kPa]	i_{ead} [kJ/kg]	i_e [kJ/kg]	s_e [kJ/kgK]	x [%]
4,0	400	3214,4	6,771	45	9,594	2139,5	2311,5	7,312	88,7
6,7	490	3390,6	6,792	45	9,594	2146,1	2345,2	7,418	90,1
7,0	515	3447,5	6,848	45	9,594	2163,4	2368,9	7,492	91,1
9,0	500	3387,3	6,660	45	9,594	2104,2	2309,5	7,306	88,6

Tabulka 10 Různé varianty admisních parametrů a příslušných suchostí

Suchost páry je ve všech případech vyhovující. První varianta je Energetické centrum Jindřichův Hradec, kde je spalována balíková sláma, která limituje kotel, a tedy i parametry admisní páry. Ze zbývajících variant je vybrána druhá, s parametry plzeňské teplárny, protože ta svými parametry a výkonem, pro který by nebyla svozová vzdálenost paliva příliš vysoká, nejlépe vyhovuje. Pro další výpočty jsou voleny parametry $p_a = 6,7 \text{ MPa}$, $t_a = 490 \text{ °C}$ a $t_e = 45 \text{ °C}$. Termické odplynění při teplotě $t_{od} = 123 \text{ °C}$.

2.6 Shrnutí kapitoly

Předmětem kapitoly bylo seznámení se s biomasou jako palivem a principem sušení, porovnání různých sušek a následně zvolení energeticky nejvýhodnější technologie sušení. Cílem dále bylo porovnání již existujících tepláren či elektráren spalujících biomasu za účelem navržení optimálních admisních a emisních parametrů páry. Z uvažovaných technologií byla zvolena technologie kontaktního sušení, jejíž výhodnost k sušení biomasy v elektrárně spočívá ve využití odběrové páry, která již vykonala práci na turbíně, ale stále obsahuje velké množství tepla, které by jinak bylo zmařeno v kondenzátoru. Z rešerše již existujících zdrojů byly zvoleny parametry oběhu pro další výpočty $p_a = 6,7 \text{ MPa}$, $t_a = 490^\circ\text{C}$ a $t_e = 45^\circ\text{C}$. Termické odplynění bude probíhat při teplotě $t_{od} = 123^\circ\text{C}$. Admisní parametry páry jsou určeny na základě parametrů využívaných v plzeňské teplárně.

V následující kapitole bude integrována kontaktní suška do oběhu parní elektrárny a vyhodnocen její energetický přínos.

3) Tepelná bilance

Nyní je potřeba prokázat, zda integrace sušky povede ke zvýšení účinnosti celého oběhu. Za tímto účelem je nutné nejprve ze zadaného paliva stanovit jeho původní stav a zjistit výhřevnost paliva pro několik úrovní vstupního obsahu vody. Následně budou provedeny stechiometrické výpočty a určena účinnost kotle. Výsledkem bude závislost účinnosti kotle na vstupním obsahu vody. Znalost účinností kotle pro vstupní obsahy vody umožní porovnat oběh s a bez sušení biomasy. Oběhy budou disponovat turbínou o stejné účinnosti, napájecím čerpadlem o stejné účinnosti a pracovat se stejnými parametry admisní a emisní páry. Teploty, při kterých bude probíhat odplynění, budou též shodné. Jediný rozdíl bude tedy v účinnosti kotle s přidanou suškou. Výsledkem bude průběh účinností oběhu s a bez sušení paliva. Závěr této kapitoly je věnován experimentálnímu měření na sušce v laboratořích ČVUT. Cílem měření je stanovit hodnoty měrných odpařivostí a energetické náročnosti sušení a porovnat energetickou náročnost s teoretickou. Tyto hodnoty budou sloužit jako podklad pro návrh zařízení a ekonomické hodnocení.

3.1 Přepočet paliva na původní stav

Pro vyhodnocení optimálního obsahu vody v palivu po sušení bude palivo přepočteno pro různé obsahy vody v rozmezí 0–70 %. Ukázkový výpočet je proveden pro zadané palivo. Pro teoretický výpočet je uvažováno, že by palivo hořelo i při vysokém obsahu vody.

Zadané palivo:

- Obsah vody	$W^r = 0,7$
- Popel v sušině	$A^d = 0,0498$
- Uhlík	$C^{daf} = 0,4967$
- Vodík	$H^{daf} = 0,0598$
- Dusík	$N^{daf} = 0,0050$
- Síra	$S^{daf} = 0,0005$
- Kyslík	$O^{daf} = 0,4380$
- Spálené teplo	$Q_s^{daf} = 19220 \text{ kJ/kg}$

Palivo je zadáno ve stavu bez vody a popela a nejprve je třeba jej přepočítat na původní stav s obsahem vody $W^r = 0,7$ pomocí vztahů (3.1) až (3.8).

Popel:

$$A^r = A^d(1 - W^r) \quad (3.1)$$

$$A^r = 0,0498(1 - 0,7)$$

$$A^r = 0,0149$$

Hořlavina:

Uhlík:

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad (3.2)$$

$$C^r = 0,4967(1 - 0,7 - 0,0149)$$

$$C^r = 0,1416$$

Vodík:

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad (3.3)$$

$$H^r = 0,0598(1 - 0,7 - 0,0149)$$

$$H^r = 0,0170$$

Síra:

$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad (3.4)$$

$$S^r = 0,0005(1 - 0,7 - 0,0149)$$

$$S^r = 0,0001$$

Dusík:

$$N^r = N^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad (3.5)$$

$$N^r = 0,0050(1 - 0,7 - 0,0149)$$

$$N^r = 0,0014$$

Kyslík:

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad (3.6)$$

$$O^r = 0,4380(1 - 0,7 - 0,0149)$$

$$O^r = 0,1249$$

Spálené teplo a výhřevnost:

Spálené teplo je přepočteno stejným způsobem, jako je přepočtena hořlavina. Výhřevnost je přepočtena pomocí vztahu (2.1).

Spálené teplo:

$$Q_s^r = Q_s^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad (3.7)$$

$$Q_s^r = 19220 \cdot (1 - 0,7 - 0,0149)$$

$$Q_s^r = 5480 \text{ kJ/kg}$$

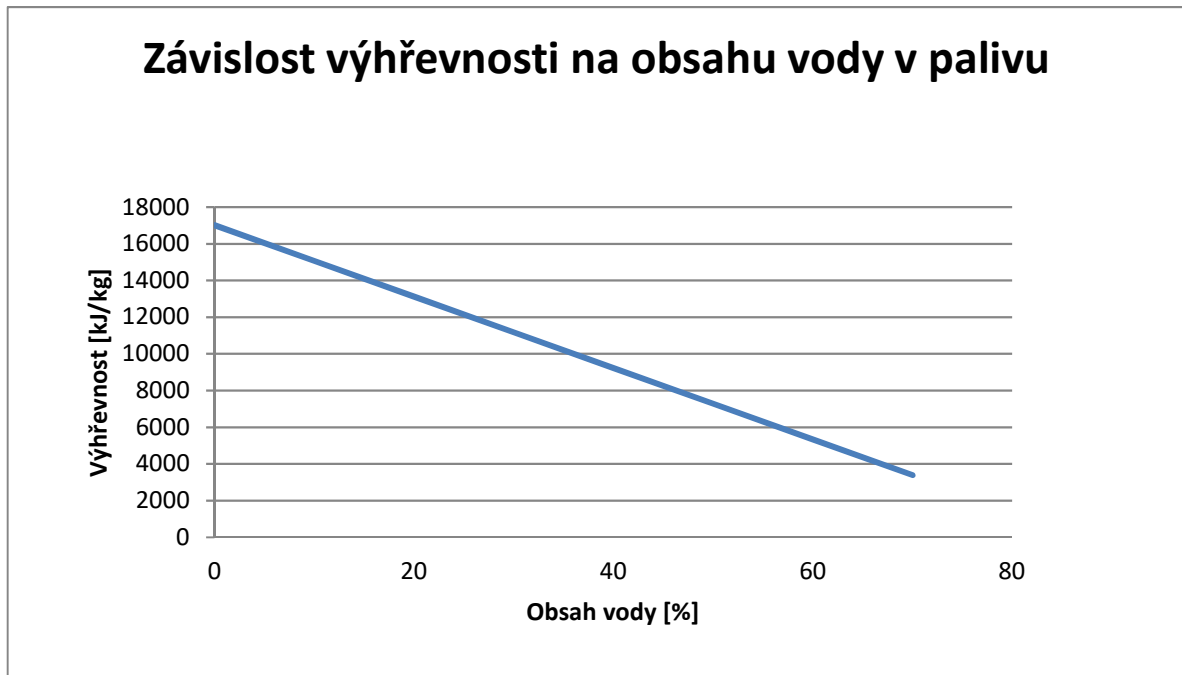
Výhřevnost:

$$Q_i^r = Q_s^r - 2453 \cdot (W^r + 8,94H^r) \quad (3.8)$$

$$Q_i^r = 5480 - 2453 \cdot (0,7 + 8,94 \cdot 0,0170)$$

$$Q_i^r = 3390 \text{ kJ/kg}$$

		W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
A^d [-]	0,0498	A^r [-]	0,0498	0,0448	0,0398	0,0349	0,0299	0,0249	0,0199	0,0149
C^{daf} [-]	0,4967	C^r [-]	0,4720	0,4248	0,3776	0,3304	0,2832	0,2360	0,1888	0,1416
H^{daf} [-]	0,0598	H^r [-]	0,0568	0,0511	0,0455	0,0398	0,0341	0,0284	0,0227	0,0170
S^{daf} [-]	0,0005	S^r [-]	0,0005	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001
N^{daf} [-]	0,0050	N^r [-]	0,0048	0,0043	0,0038	0,0033	0,0029	0,0024	0,0019	0,0014
O^{daf} [-]	0,4380	O^r [-]	0,4162	0,3746	0,333	0,2913	0,2497	0,2081	0,1665	0,1249
Q_s^{daf} [kJ/kg]	19220	Q_s^r [kJ/kg]	18263	16437	14611	12783	10957	9131	7306	5480
Q_i^{daf} [kJ/kg]	17909	Q_i^r [kJ/kg]	17017	15071	13123	11174	9228	7282	5336	3390

Tabulka 11 Přepočet paliva pro různý vstupní obsah vody W^r 

Obrázek 16 Závislost výhřevnosti na obsahu vody v palivu

3.2 Stechiometrické výpočty

Spalovací reakce uhlíku a kyslíku:



$$1 \text{ kmol} + 1 \text{ kmol} \rightarrow 1 \text{ kmol}$$

$$12,01 \text{ kg} + 22,39 \text{ m}_N^3 \rightarrow 22,27 \text{ m}_N^3$$

Spalovací reakce vodíku a kyslíku:



$$2 \text{ kmol} + 1 \text{ kmol} \rightarrow 2 \text{ kmol}$$

$$4,032 \text{ kg} + 22,39 \text{ m}_N^3 \rightarrow 44,81 \text{ m}_N^3$$

Spalovací reakce síry a kyslíku:



$$1 \text{ kmol} + 1 \text{ kmol} \rightarrow 1 \text{ kmol}$$

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

Potřebný objem kyslíku:

Stanovení potřebného množství kyslíku, aby proběhly výše uvedené reakce.

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

$$O_{O_2} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,1416}{12,01} + \frac{0,017}{4,032} + \frac{0,0001}{32,06} - \frac{0,1249}{32} \right)$$

$$O_{O_2} = 0,2711 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Potřebný objem suchého vzduchu:

Ve vzduchu je 21% podíl kyslíku.

$$O_{V_{Smin}} = \frac{O_{O_2min}}{0,21}$$

$$O_{V_{Smin}} = \frac{0,2711}{0,21}$$

$$O_{V_{Smin}} = 1,291 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Potřebný objem vlhkého vzduchu:

V atmosférickém vzduchu je obsažené určité množství vodní páry. Toto množství zohledňuje součinitel χ_v pro běžné podmínky $\varphi = 70\%$ a $t_v = 20\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž je možné volit tento součinitel roven 1,016.

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin}$$

$$O_{VVmin} = 1,016 \cdot 1,291$$

$$O_{VVmin} = 1,312 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Objem vodní páry:

Objem vodní páry vypočteme jako rozdíl O_{VSmin} a O_{VVmin} .

$$O_{H_2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin}$$

$$O_{H_2O}^V = 1,312 - 1,291$$

$$O_{H_2O}^V = 0,021 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
O_{O_2min} [m_N^3/kg]	0,9045	0,8139	0,7239	0,6334	0,5428	0,4522	0,3617	0,2711
O_{VSmin} [m_N^3/kg]	4,307	3,876	3,447	3,016	2,585	2,153	1,722	1,291
O_{VV} [m_N^3/kg]	4,376	3,938	3,502	3,064	2,626	2,187	1,750	1,312
O_{H_2O} [m_N^3/kg]	0,069	0,062	0,055	0,048	0,041	0,034	0,028	0,021

Tabulka 12 Výsledky z (3.12) až (3.15) pro různé obsahy vody

Objem oxidu uhličitého ve spalinách:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot O_{VSmin}$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,1416 + 0,0003 \cdot 1,291$$

$$O_{CO_2} = 0,2628 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Objem oxidu siřičitého ve spalínách:

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

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0001$$

$$O_{SO_2} = 0,0001 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Objem dusíku ve spalínách:

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot O_{VSmin}$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,001 + 0,7805 \cdot 1,291$$

$$O_{N_2} = 1,009 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Objem argonu ve spalínách:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VSmin}$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot 1,291$$

$$O_{Ar} = 0,0119 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Objem vodní páry ve spalínách:

$$O_{H_2O} = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + O_{H_2O}^V$$

$$O_{H_2O} = \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,0170 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,7 + 0,021$$

$$O_{H_2O} = 1,080 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
O_{CO_2} [m_N^3/kg]	0,8761	0,7885	0,7009	0,6133	0,5257	0,4381	0,3504	0,2628
O_{N_2} [m_N^3/kg]	3,365	3,029	2,693	2,357	2,020	1,682	1,346	1,009
O_{SO_2} [m_N^3/kg]	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
O_{Ar} [m_N^3/kg]	0,0396	0,0357	0,0317	0,0277	0,0238	0,0198	0,0158	0,0119
O_{H_2O} [m_N^3/kg]	0,700	0,754	0,809	0,863	0,917	0,971	1,026	1,080

Tabulka 13 Objemy jednotlivých složek spalín pro různé obsahy vody

Minimální objem suchých spalín:

$$O_{SSmin} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar}$$

$$O_{SSmin} = 0,2628 + 0,0001 + 1,009 + 0,0119$$

$$O_{SSmin} = 1,284 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

Minimální objem vlhkých spalín:

$$O_{SVmin} = O_{SSmin} + O_{H_2O}$$

$$O_{SVmin} = 1,284 + 1,080$$

$$O_{SVmin} = 2,364 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
O_{SSmin} [m_N^3/kg]	4,281	3,854	3,426	2,998	2,570	2,140	1,712	1,284
O_{SVmin} [m_N^3/kg]	4,981	4,608	4,235	3,861	3,487	3,111	2,738	2,364

Tabulka 14 Minimální objemy suchých a vlhkých spalín pro různé obsahy vody

Objem spalín z 1 kg paliva při spalování s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,5$:

$$O_{SV} = O_{SVmin} + (\alpha - 1)O_{VVmin}$$

$$O_{SV} = 2,364 + (1,5 - 1)1,312$$

$$O_{SV} = 3,020 \text{ m}_N^3/\text{kg}$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
O_{SV} [m_N^3/kg]	7,169	6,577	5,986	5,393	4,800	4,205	3,613	3,020

Tabulka 15 Objem spalín z 1 kg paliva při spalování s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,5$

3.3 Účinnost kotle

Ukázkový výpočet je proveden pro obsah vody v palivu $W^r = 10 \%$, v tabulkách jsou uvedeny výsledky pro obsahy vody 0–70 %.

Účinnost je řešena pro parametry:

- | | |
|--|--------------------------|
| - Přebytek spalovacího vzduchu | $\alpha = 1,5$ |
| - Přibližný parní výkon | $M_p = 40 \text{ t/h}$ |
| - Teplota přiváděného vzduchu | $t_{vz} = 25 \text{ °C}$ |
| - Teplota spalin za kotlem | $t_k = 150 \text{ °C}$ |
| - Poměrný úlet popílku z ohniště | $a_{\dot{u}} = 0,3$ |
| - Bez přísávání vzduchu | |
| - Bez recirkulace spalin | |
| - Bez tepla přivedeného cizím zdrojem | |
| - Palivo dřevní štěpka | |
| - Spalování na roštovém kotli s přesuvným roštem | |

Účinnost kotle je stanovena nepřímou metodou dle vztahu

$$\eta_k = 1 - Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_f - Z_k, \quad (3.12)$$

kde od maximální účinnosti jsou postupně odečítány jednotlivé ztráty:

- ztráta mechanickým nedopalem Z_c ,
- ztráta chemickým nedopalem Z_{co} ,
- ztráta sáláním a vedením tepla do okolí Z_{sv} ,
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f ,
- ztráta citelným teplem spalin (komínová) Z_k .

Před samotným stanovením ztrát je třeba určit tepelný příkon kotle, který se vyjádří pomocí redukované výhřevnosti paliva. Ta sumarizuje celkové teplo přivedené do kotle vztahované na jednotkové množství paliva. Redukovaná výhřevnost se určí dle vztahu

$$Q_{ired} = Q_i^r + i_{pv} + Q_{cz} + Q_{pr} + Q_S^{r_3}, \quad (3.13)$$

kde Q_i^r je výhřevnost paliva, i_{pv} je fyzické teplo paliva, Q_{cz} teplo přivedené cizím zdrojem, Q_{pr} je teplo přivedené parou při ofukování stěn nebo rozprašování mazutu a $Q_S^{r_3}$ je teplo ve spalinách 3. recirkulace. V našem případě je $Q_{cz} = 0$, $Q_{pr} = 0$, $Q_S^{r_3} = 0$. Ukázkový výpočet je proveden pro jeden parametr, výsledky pro ostatní parametry jsou uvedeny v tabulkách.

Měrná tepelná kapacita paliva:

$$c_{pv} = 4,19 \cdot W^r + c_{su} \cdot (1 - W^r)$$

$$c_{pv} = 4,19 \cdot 0,1 + 1,45 \cdot (1 - 0,1)$$

$$c_{pv} = 1,724 \text{ kJ/kgK},$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
c_{pv} [kJ/kgK]	1,450	1,724	1,998	2,272	2,546	2,820	3,094	3,368

Tabulka 16 Měrné tepelné kapacity paliva pro různé obsahy vody

kde c_{su} [$\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$] je měrné teplo sušiny paliva a pro dřevo je uvažována průměrná hodnota

$$c_{su} = 1,45 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] [23].$$

Fyzické teplo paliva:

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv}$$

$$i_{pv} = 1,724 \cdot 25$$

$$i_{pv} = 43,10 \text{ kJ/kg}$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
i_{pv} [kJ/kg]	36,25	43,10	49,95	56,80	63,65	70,50	77,35	84,20

Tabulka 17 Fyzické teplo paliva pro různé obsahy vody

Redukovaná výhřevnost:

$$Q_{ired} = Q_i^r + i_{pv}$$

$$Q_{ired} = 15071 + 43,10$$

$$Q_{ired} = 15114 \text{ kJ/kg}$$

w^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
Q_{ired} [kJ/kg]	17053	15114	13173	11231	9292	7353	5413	3474

Tabulka 18 Redukovaná výhřevnost pro různé obsahy vody

3.3.1 Ztráta mechanickým nedopalem Z_c

Ztráta mechanickým nedopalem představuje ztrátu nespálené hořlaviny v tuhých zbytcích. Vztah pro výpočet je

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cp} + Z_{cú} + Z_{cr} + Z_{cb}, \quad (3.14)$$

kde Z_{cs} je ztráta nedopalem ve škváře nebo strusce, Z_{cp} je ztráta nedopalem v popílku, $Z_{cú}$ je ztráta nedopalem v úletu, Z_{cr} je ztráta nedopalem v roštovém propadu u roštových kotlů, pokud se propad nevrací zpět do ohniště, Z_{cb} je ztráta uhelným práškem v brýdách. Pro náš případ platí $Z_{cb} = 0$.

Jednotlivé ztráty se určí dle vztahu

$$Z_{ci} = \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot X_i \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{ci}, \quad (3.15)$$

kde $Q_{ci} = 32600 \text{ kJ/kg}$ je průměrná hodnota výhřevnosti uvažovaného druhu tuhých zbytků. Ostatní součinitele jsou určeny z následujících tabulek.

Podíl spalitelných látek v tuhých zbytcích

Ohniště		Uhlí	Podíl spalitelných látek [-]		
			ve škváře C_s	v propadu C_r	v úletu C_u
Roštové	s pásovým roštem	hnědé	0,16	0,30	0,22
		černé	0,18	0,35	0,25
	s přesuvným roštem	hnědé	0,09	0,30	0,20
		černé	0,09	0,35	0,25
	s vratným roštem	hnědé	0,07	0,20	0,11
	s pásovým roštem s pohazováním	hnědé	0,08	0,25	0,20
černé		0,12	0,30	0,28	

Tabulka 19 Podíl spalitelných látek v tuhých zbytcích [3]

Bilance popela

Ohniště		Uhlí	Zrnění [mm]	Podíl zrn pod 2 mm	Podíl popela [-]		
					ve škváře X_s	v propadu X_r	v úletu X_u
Roštové	s pásovým roštem	hnědé	0 - 30	0,25	0,74	0,06	0,15
		černé	0 - 25	0,2	0,77	0,05	0,13
	s přesuvným roštem bez vracení propadu	hnědé	0 - 30	0,3 - 0,4	0,62	0,06	0,27
		černé	0 - 25	0,4	0,66	0,06	0,23
	s vratným roštem	hnědé	0 - 30	0,3 - 0,4	0,60	0,03	0,32
	s pásovým roštem s pohazováním	hnědé	0 - 30	0,4	0,68	-	0,27
černé		0 - 25	0,4				

Tabulka 20 Bilance popela [3]

Výpočet dílčích ztrát:**Ztráta nedopalem ve škváře:**

$$Z_{cs} = \frac{C_s}{1 - C_s} \cdot X_s \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{ci}$$

$$Z_{cs} = \frac{0,09}{1 - 0,09} \cdot 0,62 \cdot \frac{0,0448}{15114} \cdot 32600$$

$$Z_{cs} = 0,0059$$

Ztráta nedopalem v úletu:

$$Z_{cú} = \frac{C_{\dot{u}}}{1 - C_{\dot{u}}} \cdot X_{\dot{u}} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{ci}$$

$$Z_{cú} = \frac{0,20}{1 - 0,20} \cdot 0,27 \cdot \frac{0,0448}{15114} \cdot 32600$$

$$Z_{cú} = 0,0065$$

Ztráta nedopalem v roštovém propadu:

$$Z_{cr} = \frac{C_r}{1 - C_r} \cdot X_r \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{ci}$$

$$Z_{cr} = \frac{0,3}{1 - 0,3} \cdot 0,06 \cdot \frac{0,0448}{15114} \cdot 32600$$

$$Z_{cr} = 0,0025$$

Ztráta Z_c :

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cú} + Z_{cr}$$

$$Z_c = 0,0059 + 0,0065 + 0,0025$$

$$Z_c = 0,0149$$

W^f [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
Z_{cs} [-]	0,0058	0,0059	0,0060	0,0062	0,0064	0,0068	0,0073	0,0086
Z_{cr} [-]	0,0024	0,0025	0,0025	0,0026	0,0027	0,0028	0,0031	0,0036
$Z_{cú}$ [-]	0,0064	0,0065	0,0066	0,0068	0,0071	0,0075	0,0081	0,0094
Z_c [-]	0,0146	0,0149	0,0151	0,0156	0,0162	0,0171	0,0185	0,0216

Tabulka 21 Ztráta Z_c pro různé obsahy vody

3.3.2 Ztráta chemickým nedopalem Z_{co}

Ztráta chemickým nedopalem je ztráta hořlavinou ve spalínách a vyjadřuje teplo ztracené v nespálených plynech ve spalínách.

Tato ztráta je stanovena z emisního limitu, kde $CO = 400 \text{ mg/m}_N^3$ a $O_{2ref} = 11\%$ [3, str. 65].

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SSmin}}{(21 - O_{2re}) \cdot Q_{ired}}$$

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 400 \cdot 3,854}{(21 - 11) \cdot 15114}$$

$$Z_{CO} = 0,0022$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
Z_{co} [-]	0,0021	0,0022	0,0022	0,0023	0,0023	0,0025	0,0027	0,0031

Tabulka 22 Ztráta chemickým nedopalem Z_{co} pro různé obsahy vody

3.3.3 Ztráta sdílením tepla do okolí Z_{sv}

Ztráta sdílením tepla do okolí je ztráta způsobená nedokonalostí izolace pláště kotle. Její výše závisí na kvalitě izolace stěn, způsobu oplechování, velikosti povrchu a výkonu kotle.

Pro kotel s hliníkovým nátěrem oplechování a parním výkonem $M_p = 40 \text{ t/h}$ se ztráta sdílením tepla do okolí určí z diagramu [3, str. 66]. Tato ztráta je uvažována pro všechny obsahy vody stejná.

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
Z_{sv} [-]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabulka 23 Ztráta sdílením tepla do okolí Z_{sv} pro různé obsahy vody

3.3.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků je způsobena vysokou teplotou tuhých zbytků. Pro roštová ohniště se tato teplota uvažuje $t_s = 600\text{ °C}$, čemuž odpovídá hodnota měrné tepelné kapacity $c_{pop} = 0,9301\text{ kJ/kgK}$ [3, str. 47 a 66]. Vztah pro výpočet je

$$Z_f = \sum_i \frac{X_i}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot c_i \cdot t_i, \quad (3.16)$$

kde X_i a C_i jsou stejné hodnoty jako u ztráty mechanickým nedopalem, $t_i = t_s$, a c_i je měrná kapacita uvažovaného druhu tuhých zbytků.

Dílčí ztráty:

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků ve škváře:

$$\begin{aligned} Z_{fs} &= \frac{X_s}{1 - C_s} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot c_s \cdot t_s \\ Z_{fs} &= \frac{0,62}{1 - 0,09} \cdot \frac{0,0448}{15114} \cdot 0,9301 \cdot 600 \\ Z_{fs} &= 0,0011 \end{aligned}$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v roštovém propadu:

$$\begin{aligned} Z_{fr} &= \frac{X_r}{1 - C_r} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot c_s \cdot t_s \\ Z_{fr} &= \frac{0,06}{1 - 0,3} \cdot \frac{0,0448}{15114} \cdot 0,9301 \cdot 600 \\ Z_{fr} &= 0,0001 \end{aligned}$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků v úletu:

$$Z_{fú} = \frac{X_{ú}}{1 - C_{ú}} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot c_s \cdot t_s$$

$$Z_{fú} = \frac{0,27}{1 - 0,2} \cdot \frac{0,0448}{15114} \cdot 0,9301 \cdot 600$$

$$Z_{fú} = 0,0006$$

Ztráta Z_f :

$$Z_f = Z_{fs} + Z_{fr} + Z_{fú}$$

$$Z_f = 0,0011 + 0,0001 + 0,0006$$

$$Z_f = 0,0018$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
Z_{fs} [-]	0,0011	0,0011	0,0011	0,0012	0,0012	0,0013	0,0014	0,0016
Z_{fr} [-]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
$Z_{fú}$ [-]	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0007	0,0008
Z_f [-]	0,0018	0,0018	0,0018	0,0019	0,0020	0,0021	0,0023	0,0026

Tabulka 24 Ztráta Z_f pro různé obsahy vody**3.3.5 Ztráta citelným teplem spalin (komínová) Z_k :**

Ztráta citelným teplem spalin je ztráta tepla odcházející z kotle v plynech. Jde o nejnvýznamnější ztrátu, která má vliv na účinnost kotle. Výpočet je dán vztahem

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_S^{t_k, \alpha_k} - I_S^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_{ired}}, \quad (3.17)$$

kde Z_c je ztráta mechanickým nedopalem, $I_S^{t_k, \alpha_k}$ je entalpie spalin při dané teplotě a přebytku spalovacího vzduchu, $I_S^{t_{vz}, \alpha_k}$ je entalpie spalin při teplotě v kotelně a Q_{ired} je redukováná výhřevnost.

Entalpie stechiometrických spalin ($\alpha = 1$):

Teplota [°C]	25	150
i_{CO_2} [kJ/kg]	41,62	263,75
i_{SO_2} [kJ/kg]	46,81	292,65
i_{N_2} [kJ/kg]	32,53	194,70
i_{Ar} [kJ/kg]	23,32	139,54
i_{H_2O} [kJ/kg]	39,10	227,55
i_{pop} [kJ/kg]	20,20	125,20
i_{vz} [kJ/kg]	32,57	198,50

Tabulka 25 Entalpie složek spalin

$$I_{Smin}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + a_{\dot{u}} \cdot A^r \cdot i_{pop}^t$$

$$I_{Smin}^{25^\circ C} = 0,7885 \cdot 41,62 + 0,0003 \cdot 46,81 + 3,029 \cdot 32,53 + 0,0357 \cdot 23,32$$

$$+ 0,754 \cdot 39,1 + 0,3 \cdot 0,0448 \cdot 20,2$$

$$I_{Smin}^{25^\circ C} = 161,95 \text{ kJ/kg},$$

kde $a_{\dot{u}} = 0,3$ je poměrný úlet popílku.

Entalpie minimálního množství vzduchu:

$$I_{Vmin}^t = O_{VSmin} \cdot i_{VS}^t + O_{H_2O}^v \cdot i_{H_2O}^t$$

$$I_{Vmin}^{25^\circ C} = 3,876 \cdot 32,57 + 0,062 \cdot 39,10$$

$$I_{Vmin}^{25^\circ C} = 128,67 \text{ kJ/kg}$$

Entalpie spalin o teplotě t [°C] a přebytku spalovacího vzduchu $\alpha = 1,5$ [-]:

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t$$

$$I_S^{25^\circ C, 1,5} = 161,95 + (1,5 - 1) \cdot 128,67$$

$$I_S^{25^\circ C, 1,5} = 226,29 \text{ kJ/kg}$$

Tabulka výsledků pro obě teplotní úrovně a různé obsahy vody:

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
I_{Smin}^{150} [kJ/kg]	1053	976,04	899,28	822,28	745,11	667,71	590,93	513,77
I_{Vmin}^{150} [kJ/kg]	870,64	783,49	696,74	609,6	522,45	435,11	348,19	261,04
$I_s^{150,1,5}$ [kJ/kg]	1488,3	1367,8	1247,7	1127,1	1006,3	885,27	765,03	644,29
I_{Smin}^{25} [kJ/kg]	174,54	161,95	149,4	136,81	124,19	111,53	98,98	86,36
I_{Vmin}^{25} [kJ/kg]	142,98	128,67	114,42	100,11	85,8	71,45	57,18	42,87
$I_s^{25,1,5}$ [kJ/kg]	246,03	226,29	206,61	186,87	167,09	147,26	127,57	107,8

Tabulka 26 Entalpie spalin o dané teplotě a přebytku vzduchu

Výpočet komínové ztráty:

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_S^{t_k, \alpha_k} - I_S^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_{ired}}$$

$$Z_k = (1 - 0,0149) \cdot \frac{1367,79 - 226,29}{15114}$$

$$Z_k = 0,0744$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
Z_k [-]	0,0718	0,0744	0,0778	0,0824	0,0889	0,0987	0,1156	0,1511

Tabulka 27 Komínová ztráta Z_k pro různé obsahy vody**3.3.6 Účinnost kotle**

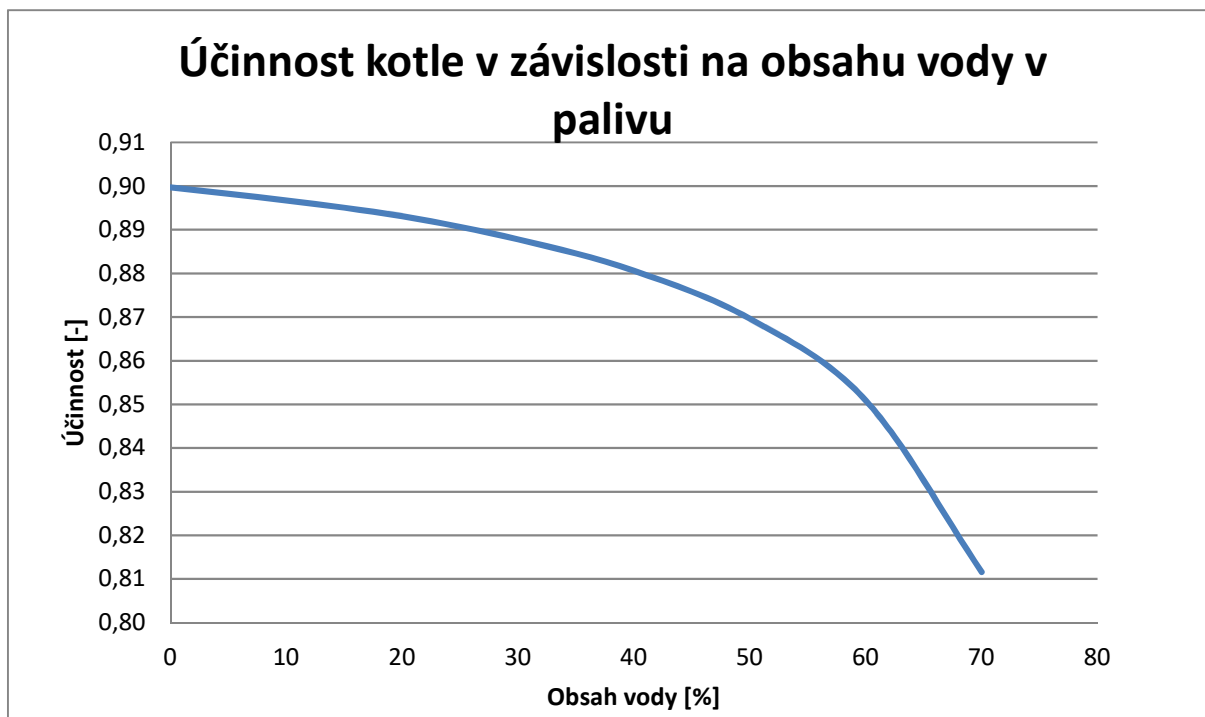
$$\eta_k = 1 - Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_f - Z_k$$

$$\eta_k = 1 - 0,0149 - 0,0022 - 0,01 - 0,0018 - 0,0744$$

$$\eta_k = 0,8967$$

W^r [%]	0	10	20	30	40	50	60	70
η_k [-]	0,8997	0,8967	0,8931	0,8878	0,8806	0,8696	0,8509	0,8116

Tabulka 28 Účinnost kotle pro různé obsahy vody



Obrázek 17 Účinnost kotle v závislosti na obsahu vody v palivu

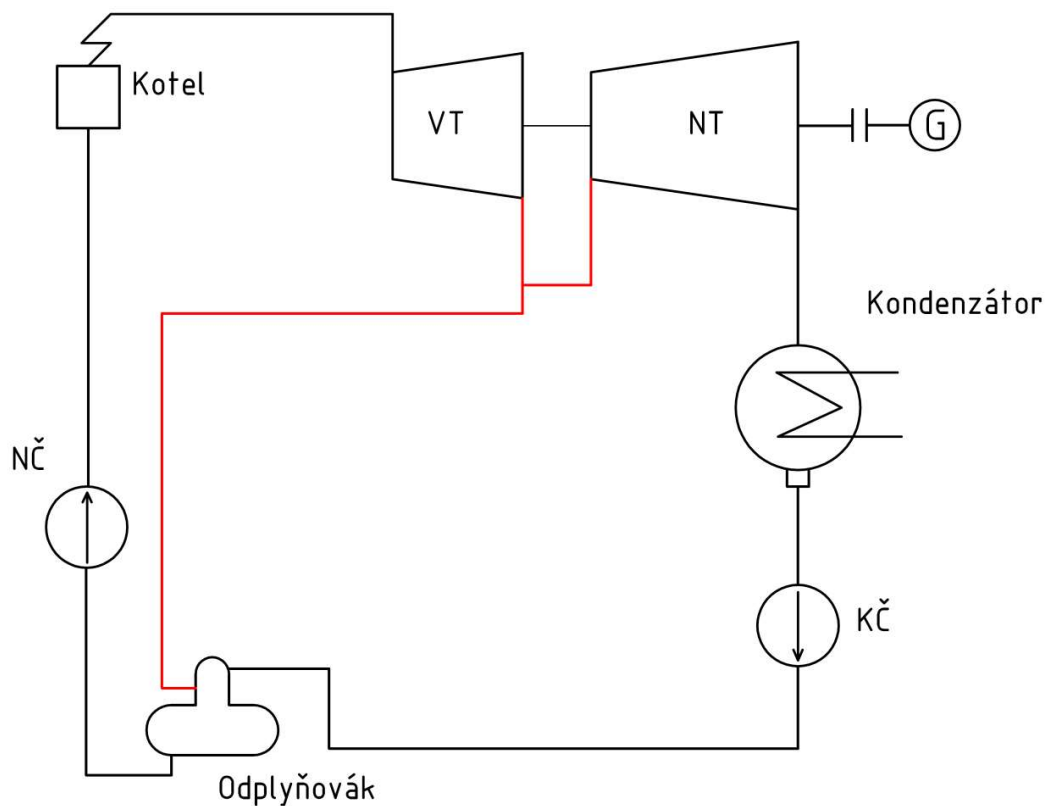
Zhodnocení:

Z grafu (obrázek 17) je zřejmé, že obsah vody v palivu má zásadní vliv na účinnost kotle. V následující podkapitole, zabývající se účinností oběhu se sušením a bez sušení paliva, bude pro oběh bez sušení paliva uvažováno vlhké palivo o obsahu vody 70 % a pro oběh se sušením paliva o obsahu vody 10 %. Palivo vystupující ze sušky nemusí být okamžitě spalováno, ale může být dočasně uskladněno, a proto nebude uvažováno využití citelného tepla paliva s teplotou 100 °C.

3.4 Účinnost oběhu bez sušení paliva

Parametry:

- Admisní teplota	$t_a = 490 \text{ }^\circ\text{C}$
- Admisní tlak	$p_a = 6,7 \text{ MPa}$
- Emisní teplota	$t_e = 45 \text{ }^\circ\text{C}$
- Účinnost kotle	$\eta_k^{70\%} = 81,16 \%$
- Účinnost termodynamická	$\eta_{td} = 84 \%$
- Účinnost mechanická	$\eta_m = 99 \%$
- Účinnost generátoru	$\eta_g = 98 \%$
- Účinnost elektromotoru	$\eta_{mot} = 95 \%$
- Účinnost čerpadla	$\eta_{\check{c}} = 75 \%$
- Termické odplynění při teplotě	$t_{od} = 123 \text{ }^\circ\text{C}$
- Obsah vody v palivu	$W^r = 70 \%$
- Redukovaná výhřevnost paliva ($W^r = 70 \%$)	$Q_i^r = 3474 \text{ kJ/kg}$



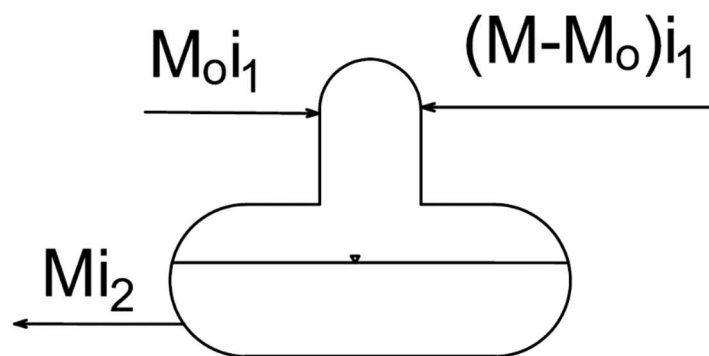
Obrázek 18 Schéma oběhu parní elektrárny bez sušky

Z důvodů energetických ztrát v parovodech je teplota odběrové páry volena o 2 °C vyšší, tedy $t_o = 125$ °C. Entalpie jsou odečteny pomocí programu SteamProperty.

Entalpie:

- Admisní entalpie $i_a = 3390,61 \text{ kJ/kg}$
- Emisní entalpie adiabatická $i_{ead} = i_{eadNT} = 2146,13 \text{ kJ/kg}$
- Emisní entalpie $i_e = 2345,25 \text{ kJ/kg}$
- Entalpie odběrové páry $i_o = i_{eadVT} = 2726,17 \text{ kJ/kg}$
- Entalpie vody za kondenzátorem $i_1 = 188,63 \text{ kJ/kg}$
- Entalpie vody za odplyňovákem $i_2 = 516,55 \text{ kJ/kg}$

Bilance odplyňováku:



Obrázek 19 Bilance odplyňováku

Bilanční rovnice:

$$M_o i_o + (M - M_o) i_1 = M i_2 \quad (3.18)$$

$$M_o = M \cdot \frac{i_2 - i_1}{i_o - i_1}$$

$$M_o = M \cdot \frac{516,55 - 188,63}{2726,17 - 188,63}$$

$$M_o = 0,1292 \cdot M$$

Zvýšení entalpie napájecí vody napájecím čerpadlem:

Vlivem tlakových ztrát v kotli nastává nutnost, aby čerpadlo dodalo přibližně o 30 % větší tlak než admisní.

$$p_{N\check{c}} = 1,3 \cdot p_a$$

$$p_{N\check{c}} = 1,3 \cdot 6700$$

$$p_{N\check{c}} = 8710 \text{ kPa}$$

Programem SteamProperty byl odečten tlak v odplyňováku $p_{od} = 218,3 \text{ kPa}$ pro teplotu $t = 123 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$i_{N\check{c}} = \frac{(p_{N\check{c}} - p_{od}) \cdot v_{st\check{r}}}{\eta_{\check{c}}}$$

$$i_{N\check{c}} = \frac{(8710 - 218,3) \cdot 0,001069}{0,75}$$

$$i_{N\check{c}} = 12,10 \text{ kJ/kg}$$

Entalpie napájecí vody:

$$i_{nv} = i_2 + i_{N\check{c}}$$

$$i_{nv} = 516,55 + 12,10$$

$$i_{nv} = 528,65 \text{ kJ/kg}$$

Pára získaná spálením 1 kg paliva:

$$M = \frac{M_{pv} \cdot Q_{ired} \cdot \eta_k^{70\%}}{(i_a - i_{nv})}$$

$$M = \frac{1 \cdot 3474 \cdot 0,8116}{(3390,61 - 528,65)}$$

$$M = 0,985 \text{ kg/s}$$

Adiabatický spád na VT dílu

$$H_{adVT} = i_a - i_o$$

$$H_{adVT} = 3390,61 - 2726,17$$

$$H_{adVT} = 664,44 \text{ kJ/kg}$$

Teoretický výkon VT dílu:

$$P_{teorVT} = M \cdot H_{adVT}$$

$$P_{teorVT} = 0,985 \cdot 664,44$$

$$P_{teorVT} = 654,47 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Adiabatický spád na NT dílu

$$H_{adNT} = i_o - i_{eadNT}$$

$$H_{adNT} = 2726,17 - 2146,13$$

$$H_{adNT} = 580,04 \text{ kJ/kg}$$

Teoretický výkon NT dílu:

$$P_{teorNT} = (M - M_o) \cdot H_{adNT}$$

$$P_{teorNT} = (0,985 - 0,1292 \cdot 0,985) \cdot 580,04$$

$$P_{teorNT} = 497,5 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Svorkový výkon:

$$P_{sv} = (P_{teorVT} + P_{teorNT}) \cdot \eta_{td} \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

$$P_{sv} = (654,47 + 497,5) \cdot 0,84 \cdot 0,99 \cdot 0,98$$

$$P_{sv} = 938,82 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Příkon napájecího čerpadla:

$$P_{N\check{c}} = \frac{i_{N\check{c}} \cdot M}{\eta_{mot} \cdot \eta_m}$$

$$P_{N\check{c}} = \frac{12,1 \cdot 0,985}{0,95 \cdot 0,99}$$

$$P_{N\check{c}} = 12,67 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Výkon oběhu po vlastní spotřebě:

$$P_{VL,Sp}^{bs70\%} = P_{sv} - P_{N\check{c}}$$

$$P_{VL,Sp}^{bs70\%} = 938,82 - 12,67$$

$$P_{VL,Sp}^{bs70\%} = 926,15 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Účinnost oběhu bez sušení paliva:

$$\eta_{celk}^{bs70\%} = \frac{P_{sv} - P_{N\check{c}}}{M_{pv} \cdot Q_{ired}} * 100$$

$$\eta_{celk}^{bs70\%} = \frac{938,82 - 12,67}{1 \cdot 3474} * 100$$

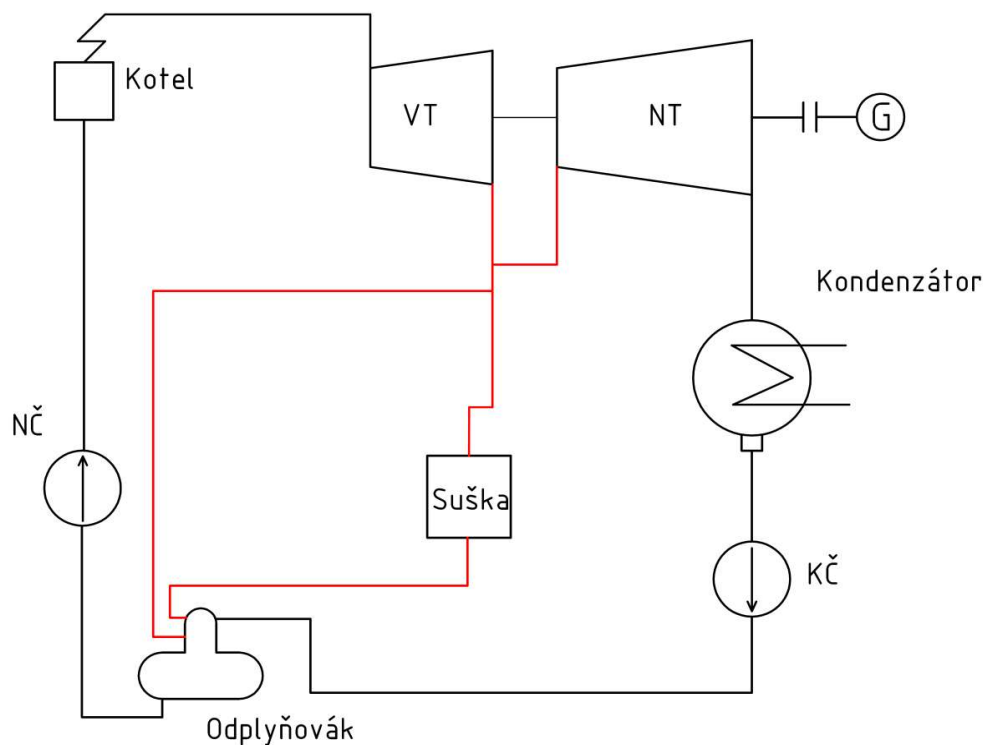
$$\eta_{celk}^{bs70\%} = 26,66 \%$$

3.5 Účinnost oběhu se sušením paliva

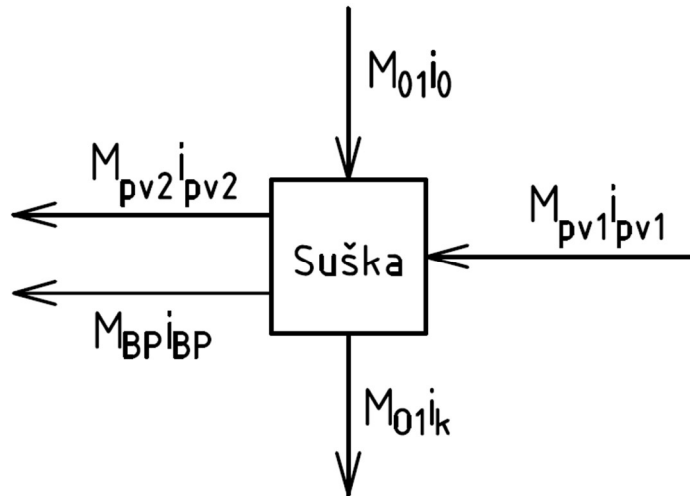
Zadané parametry jsou shodné s oběhem bez sušení paliva, jen s rozdílem v účinnosti kotle a výhřevnosti paliva.

Parametry:

- | | |
|--|--|
| - Účinnost kotle | $\eta_k^{10\%} = 89,67 \%$ |
| - Termické odplynění při teplotě | $t_{od} = 123 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| - Teplota paliva na vstupu | $t_{pv1} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| - Teplota paliva na výstupu | $t_{pv2} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| - Entalpie brýdové páry | $i_{BP} = 2675,57 \text{ kJ/kg}$ |
| - Entalpie kondenzátu ze sušky | $i_k = 419,10 \text{ kJ/kg}$ |
| - Obsah vody v palivu na vstupu | $W_1^r = 70 \%$ |
| - Obsah vody v palivu na výstupu | $W_2^r = 10 \%$ |
| - Adiabatický spád na VT dílu | $H_{adVT} = 664,44 \text{ kJ/kg}$ |
| - Adiabatický spád na NT dílu | $H_{adNT} = 580,04 \text{ kJ/kg}$ |
| - Redukovaná výhřevnost paliva $W^r = 10 \%$ | $Q_i^r = 15114 \text{ kJ/kg}$ |



Obrázek 20 Schéma oběhu se suškou

Bilance sušky:

Obrázek 21 Bilance sušky

Bilanční rovnice:

$$M_{o1} \cdot i_{o1} + M_{pv} \cdot i_{pv} = M_{o1} \cdot i_{k1} + M_{pv} \cdot i_{pv} + M_{BP} \cdot i_{BP}$$

Citelné teplo vstupního paliva:

$$i_{pv1} = ((1 - W_1^r) \cdot c_{su} + 4,19 \cdot W_1^r) \cdot t_{pv1}$$

$$i_{pv} = ((1 - 0,7) \cdot 1,45 + 4,19 \cdot 0,7) \cdot 25$$

$$i_{pv1} = 84,2 \text{ kJ/kg}$$

Citelné teplo výstupního paliva:

$$i_{pv2} = ((1 - W_2^r) \cdot c_{su} + 4,19 \cdot W_2^r) \cdot t_{pv}$$

$$i_{pv2} = (1 - 0,1) \cdot 1,45 + 4,19 \cdot 0,1) \cdot 100$$

$$i_{pv2} = 172,4 \text{ kJ/kg}$$

Hmotnostního tok paliva na výstupu ze sušky:

Během sušení bude klesat hmotnostní tok paliva o hodnotu odpařené vody.

$$M_{pv2} = M_{pv1} \cdot \left(1 - \frac{W_1^r - W_2^r}{1 - W_2^r}\right)$$

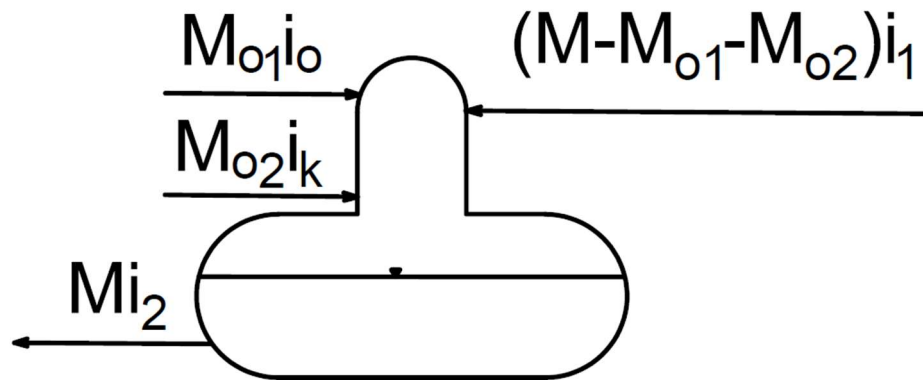
Poměrné množství páry pro sušku:

Dosazením předchozích vztahů do bilanční rovnice získáme:

$$M_{01} = \frac{M_{pv1}}{(i_o - i_k)} \cdot \left(\left(1 - \frac{W_1^r - W_2^r}{1 - W_2^r} \right) \cdot i_{pv2} - i_{pv1} + \left(\frac{W_1^r - W_2^r}{1 - W_2^r} \right) \cdot i_{BP} \right)$$

$$M_{01} = \frac{1}{(2726,17 - 419,10)} \cdot \left(\left(1 - \frac{0,7 - 0,1}{1 - 0,1} \right) \cdot 172,4 - 84,2 + \left(\frac{0,7 - 0,1}{1 - 0,1} \right) \cdot 2675,57 \right)$$

$$M_{01} = 0,7616 \text{ kg/s}$$

Bilance odplyňováku:

Obrázek 22 Bilance odplyňováku

Bilanční rovnice:

$$M_{01} i_k + M_{02} i_o + M i_1 - M_{01} i_1 - M_{02} i_1 = M i_2$$

$$M_{02} = \frac{M_{01} \cdot (i_1 - i_k) + M \cdot (i_2 - i_1)}{i_o - i_1}$$

$$M_{02} = \frac{0,7616 \cdot (188,63 - 419,10) + 1,578 \cdot (516,55 - 188,63)}{2726,17 - 188,63}$$

$$M_{02} = 0,1347 \text{ kg/s}$$

Celkové poměrné množství páry:

$$M_{celk} = M_{01} + M_{02}$$

$$M_{celk} = 0,7616 + 0,1347$$

$$M_{celk} = 0,8963 \text{ kg/s}$$

Pára získaná spálením 1 kg paliva:

Hodnoty skutečného entalpického spádu, entalpického spádu odběru a poměrného spádu zůstávají stejné i pro oběh se sušením paliva.

$$M = \frac{M_{pv} \cdot \left(1 - \frac{W_1^r - W_2^r}{1 - W_2^r}\right) \cdot Q_{ired} \cdot \eta_k^{10\%}}{(i_a - i_{nv})}$$

$$M = \frac{1 \cdot \left(1 - \frac{0,7 - 0,1}{1 - 0,1}\right) \cdot 15114 \cdot 0,8967}{(3390,61 - 528,65)}$$

$$M = 1,578 \text{ kg/s}$$

Teoretický výkon VT dílu:

$$P_{teorVT} = M \cdot H_{adVT}$$

$$P_{teorVT} = 1,578 \cdot 664,44$$

$$P_{teorVT} = 1048,49 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Teoretický výkon NT dílu:

$$P_{teorNT} = (M - M_{celk}) \cdot H_{adNT}$$

$$P_{teorNT} = (1,578 - 0,8963) \cdot 580,04$$

$$P_{teorNT} = 395,41 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Svorkový výkon:

$$P_{sv} = (P_{teorVT} + P_{teorNT}) \cdot \eta_{td} \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

$$P_{sv} = (1048,49 + 395,41) \cdot 0,84 \cdot 0,99 \cdot 0,98$$

$$P_{sv} = 1176,73 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Příkon napájecího čerpadla:

$$P_{N\check{c}} = \frac{i_{N\check{c}} \cdot M}{\eta_{mot} \cdot \eta_m}$$

$$P_{N\check{c}} = \frac{12,10 \cdot 1,578}{0,95 \cdot 0,99}$$

$$P_{N\check{c}} = 20,3 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Výkon oběhu po vlastní spotřebě:

$$P_{VL,Sp}^{ss70\%} = P_{sv} - P_{N\check{c}}$$

$$P_{VL,Sp}^{ss70\%} = 1176,73 - 20,3$$

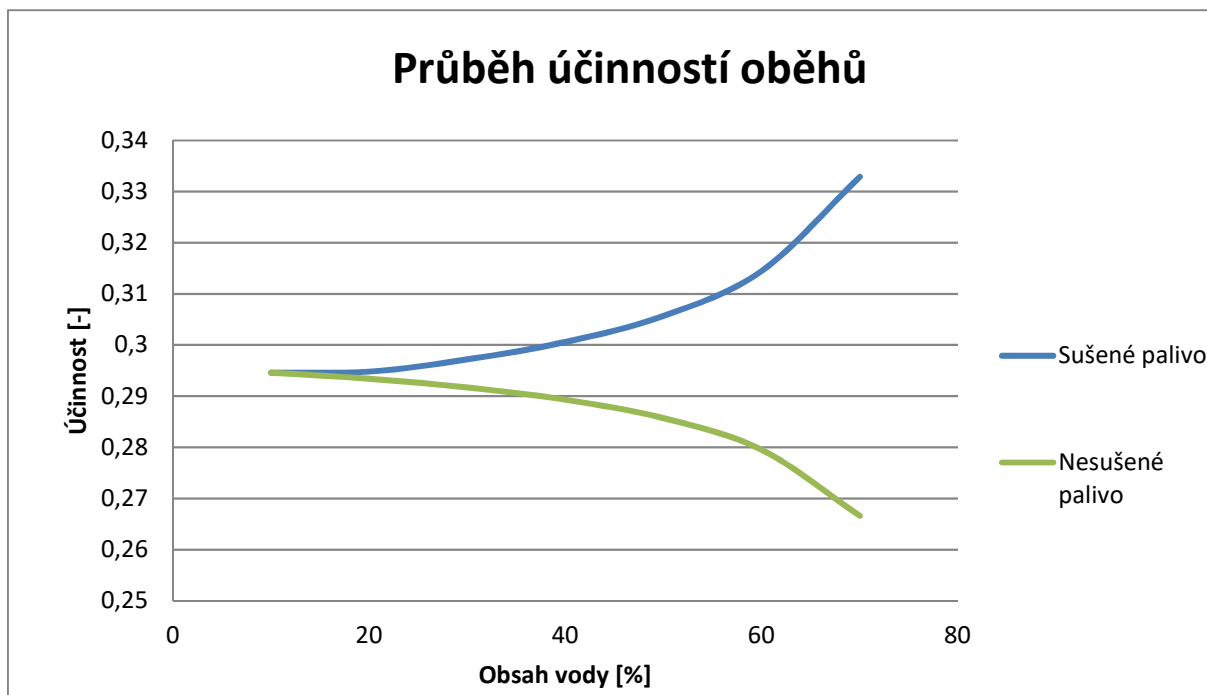
$$P_{VL,Sp}^{ss70\%} = 1156,43 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Účinnost oběhu se sušením:

$$\eta_{celk}^{ss70\%} = \frac{P_{sv} - P_{N\check{c}}}{M_{pv1} \cdot Q_{ired}} * 100$$

$$\eta_{celk}^{ss70\%} = \frac{1176,73 - 20,3}{1 \cdot 3474} * 100$$

$$\eta_{celk}^{ss70\%} = 33,29 \%$$



Obrázek 23 Průběh účinností oběhů

Zhodnocení:

Porovnání spalování velmi mokrého paliva a stejného paliva, které bude nejprve vysušeno prostřednictvím sušky, ukazuje, že dojde k významnému zvýšení účinnosti celého oběhu. Rozdíl v účinnosti je tím větší, čím větší je obsah vody ve vstupním palivu.

3.6 Měření na experimentální sušce

Pro vyhodnocení ekonomické návratnosti je třeba odhadnout cenu zařízení. Za tímto účelem proběhlo měření na experimentální sušce (obrázek 24). Z naměřených dat bude možné stanovit velikost zařízení a následně i jeho cenu. Cílem měření je získat hodnoty měrné plošné odpařivosti, měrné objemové odpařivosti a energetické náročnosti sušení. Všechna měření probíhala v laboratořích FS ČVUT v Praze.



Obrázek 24 Experimentální suška [24]

Měrná plošná odpařivost:

Tento parametr charakterizuje, jaké množství vody se odpaří ze štěrky na 1 m² vyhřívané plochy sušky za hodinu. Je dán vztahem

$$o_s = \frac{m_w}{S} \left[\frac{kg_w}{m^2 \cdot h} \right], \quad (3.19)$$

kde m_w [kg/h] je celková hmotnost odpařené vody za hodinu a S [m²] je vnitřní plocha sušky, tedy obsah teplosměnné plochy. Vzhledem k tomu, že všechna měření proběhla na stejném zařízení, je plocha S pro všechna měření stejná, avšak v každém měření bylo použito jiné množství štěrky s různým obsahem vody, což se projevilo v různých hodnotách odpařené vody.

Měrná objemová odpařivost:

Tento parametr charakterizuje, jaké množství vody se odpaří ze štěpky v 1 m³ vnitřního objemu sušky za hodinu. Je dán vztahem

$$o_s = \frac{m_w}{V} \left[\frac{kg_w}{m^3 \cdot h} \right], \quad (3.20)$$

kde m_w [kg/h] je celková hmotnost odpařené vody za hodinu a V [m³] je vnitřní objem sušky. Objem je též pro všechna měření shodný a i v tomto případě se mění hodnota tohoto parametru v závislosti na množství štěpky a vstupním obsahu vody.

Energetická náročnost sušení:

Tento parametr charakterizuje, jaké množství energie je potřeba dodat k odpaření 1 kg vody z biomasy. Na rozdíl od teoretického výpočtu tento parametr zohledňuje ztráty v sušce a je dán vztahem

$$E = \frac{(i_o - i_k) \cdot m_k}{1000 \cdot m_w} \left[\frac{MJ}{kg_w} \right], \quad (3.21)$$

kde i_o [$\frac{kJ}{kg}$] je entalpie odběrové páry, i_k [$\frac{kJ}{kg}$] je entalpie kondenzátu, m_k [kg] je hmotnost kondenzátu a m_w [kg_w] je hmotnost odpařené vody ze štěpky.

Postup a metoda měření:

Nejprve bylo potřeba připravit štěpku pro měření. Štěpka byla ponechána ve vodě po dobu dvou dnů před měřením. V den měření bylo třeba nejprve najet parovody. Otevřením hlavního uzávěru větve byla vpuštěna pára do potrubního systému v laboratořích. Následným otevíráním dílčích ventilů byl parovod najížděn až na požadované parametry. Požadované parametry bylo možné upravovat pomocí hlavního uzávěru a redukčním ventilem před vstupem do sušky.

Dále byly odebrány vzorky štěpky (obrázek 25) a zjištěn obsah vody v ní, který se pohyboval okolo 64 %.



Obrázek 25 Měřený vzorek štěpky [24]

Pro stanovení obsahu vody ve štěpce byla štěpka důkladně promíchána a kvartační metodou byly odebrány vzorky. Ty byly následně umístěny na předem zvážené misky. Misky s odebranou štěpkou byly znovu zváženy a poté vloženy do vzdušné sušky (obrázek 26) s teplotou vzduchu 110 °C na přibližně jednu hodinu, což zajistilo odstranění veškeré vody ze štěpky.



Obrázek 26 Horkovzdušná suška [24]

Následně byla opět zvážena hmotnost misky s již suchou štěpkou a z rozdílu hmotností bylo možné stanovit počáteční obsah vody. Před samotným měřením byla ještě změřena hmotnost a objem vsázky a proběhlo nahřátí sušky jejím uvedením do chodu a puštěním páry dovnitř. V sušce byly v přední a zadní části bubnu

nainstalovány teploměry, takže bylo možné sledovat vývoj teploty v prostoru bubny. Poté začalo plnění sušky, které trvalo přibližně 6 až 10 minut. Suška byla navržena jako kontinuální zařízení, štěpka tedy vystupuje ze zařízení i během provozu stroje. Vzhledem k velikosti zařízení nestačil jeden průchod štěpky k jejímu vysušení a bylo třeba štěpku opětovně vracet. K tomuto účelu byla použita odměrná nádoba. Vždy, když byla nádoba naplněna na konstantní objem, došlo ke zvážení a vrácení zpět do sušky, kromě 1. a 2. měření, kde byl sledován pouze výstupní obsah vody po hodině sušení. Doba plnění odměrné nádoby byla relativně konstantní, to svědčí o dobrém rozložení štěpky v prostoru sušky a relativně přesném odběru. Hmotnost postupně klesala a bylo možné stanovit průběh sušicí křivky. Křivku bylo třeba korigovat, jelikož objem štěpky se při sušení zmenšoval, ale do odměrné nádoby byl nabírán stále stejný objem. Vzhledem k tomu, že jsme znali vstupní a výstupní objem veškeré použité štěpky a průběh sušení byl relativně lineární, byla i pro korekci objemu zvolena lineární interpolace. Na křivce jsou vidět všechny tři fáze popsané v úvodní části práce (2.3). V okamžiku, kdy se hmotnost přestala významně měnit a teplota v sušce začala růst, byla štěpka vysušena a měření ukončeno. Po ukončení sušení byly opět odebrány vzorky štěpky a provedeno identické stanovení obsahu vody jako při stanovení počátečního obsahu vody. Během měření došlo ke ztrátě části štěpky vlivem manipulace a nedokonalosti vyprázdnění sušky, avšak tyto ztráty byly vzhledem k množství sušené štěpky zanedbatelné. Určité nepřesnosti při stanovování obsahu vody mohlo být dosaženo kvůli tomu, že vysušená štěpka částečně absorbovala vzdušnou vlhkost, avšak i tato nepřesnost byla zanedbatelná.



Obrázek 27 Štěpka mokrá vlevo, suchá vpravo [24]

Podmínky měření

Podmínky měření lze rozdělit na podmínky, které byly shodné pro všechna měření, a podmínky, které se pro jednotlivá měření měnily. Mezi podmínky proměnné patří objem vsázky, doba plnění sušky, vstupní obsah vody, doba sušení a otáčky bubnu. Naopak mezi podmínky, které byly pro všechna měření identické, patří rozměry sušky, parametry topné páry, entalpie kondenzátu a předané teplo.

Rozměry sušky	
Vnitřní plocha [m ²]	6,42
Vnitřní objem [m ³]	0,597
Parametry topného média	
Teplota topné páry [°C]	135
Tlak topné páry [bar]	3,2
Entalpie topné páry [kJ/kg]	2727,9
Entalpie kondenzátu [kJ/kg]	567,77
Předané teplo [kJ/kg]	2160,13

Tabulka 29 Rozměry sušky a parametry topného média

Výsledky měření:**Měření č. 1**

První a druhé měření měla spíše charakter seznámení se se strojem a vyzkoušení způsobu měření. I přesto je možné některá z těchto dat využít.

Měření č. 1	
Vstup	
Biomasa na vstupu [kg]	21,6
Vstupní obsah vody [%]	69,2
Obsah vody [kg]	13,5
Výstup	
Biomasa na výstupu [kg]	9,8
Výstupní obsah vody [%]	16,6
Odpařená voda [kg]	11,8
Množství kondenzátu [kg]	17,6
Doba sušení [min]	60
Otáčky bubnu [min^{-1}]	2,1
Měrná plošná odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$]	1,85
Měrná objemová odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{h}$]	19,85
Energetická náročnost [MJ/kg_w]	3,43

Tabulka 30 Měření 1

Měření č. 2

Měření č. 2	
Vstup	
Biomasa na vstupu [kg]	23,2
Vstupní obsah vody [%]	62,2
Obsah vody [kg]	14,4
Výstup	
Biomasa na výstupu [kg]	11,1
Výstupní obsah vody [%]	21,1
Odpařená voda [kg]	12,1
Množství kondenzátu [kg]	18,2
Doba sušení [min]	60
Otáčky bubnu [min^{-1}]	2,6
Měrná plošná odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$]	1,89
Měrná objemová odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{h}$]	20,27
Energetická náročnost [MJ/kg_w]	3,46

Tabulka 31 Měření 2

Měření č. 3

Ve třetím a čtvrtém měření bylo změněno zaplnění sušky a zároveň měření pokračovala, dokud štěpka nebyla vysušena na požadovanou hodnotu. Bylo tedy možné sestavit sušicí křivku.

Měření č. 3	
Vstup	
Biomasa na vstupu [kg]	34,5
Vstupní obsah vody [%]	64,5
Obsah vody [kg]	22,3
Výstup	
Biomasa na výstupu [kg]	12
Výstupní obsah vody [%]	4,1
Odpařená voda [kg]	22,5
Množství kondenzátu [kg]	36,7
Doba sušení [min]	117
Otáčky bubnu [min^{-1}]	2,6
Měrná plošná odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$]	1,59
Měrná objemová odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{h}$]	17,13
Energetická náročnost [MJ/kg_w]	3,52

Tabulka 32 Měření 3

Měření č. 4

Měření č. 4	
Vstup	
Biomasa na vstupu [kg]	38,9
Vstupní obsah vody [%]	64,5
Obsah vody [kg]	25
Výstup	
Biomasa na výstupu [kg]	13,6
Výstupní obsah vody [%]	3,7
Odpařená voda [kg]	25,3
Množství kondenzátu [kg]	42,85
Doba sušení [min]	133
Otáčky bubnu [min^{-1}]	2,6
Měrná plošná odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$]	1,68
Měrná objemová odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{h}$]	18,03
Energetická náročnost [MJ/kg_w]	(4,62)

Tabulka 33 Měření 4

Měření č. 5

V posledních dvou měřeních byla suška zaplněna ještě více než v předchozích měřeních, dále pak u pátého a šestého měření byly rozdílné otáčky bubnu.

Měření č. 5	
Vstup	
Biomasa na vstupu [kg]	63,5
Vstupní obsah vody [%]	65,5
Obsah vody [kg]	41,6
Výstup	
Biomasa na výstupu [kg]	23,3
Výstupní obsah vody [%]	14,8
Odpařená voda [kg]	40,2
Množství kondenzátu [kg]	60,25
Doba sušení [min]	180
Otáčky bubnu [min^{-1}]	2,6
Měrná plošná odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$]	2,03
Měrná objemová odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{h}$]	21,84
Energetická náročnost [MJ/kg_w]	3,24

Tabulka 34 Měření 5

Měření č. 6

Měření č. 6	
Vstup	
Biomasa na vstupu [kg]	65,1
Vstupní obsah vody [%]	60,6
Obsah vody [kg]	39,4
Výstup	
Biomasa na výstupu [kg]	25,1
Výstupní obsah vody [%]	17
Odpařená voda [kg]	40
Množství kondenzátu [kg]	55,55
Doba sušení [min]	165
Otáčky bubnu [min^{-1}]	1,3
Měrná plošná odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$]	1,94
Měrná objemová odpařivost [$\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{h}$]	20,91
Energetická náročnost [MJ/kg_w]	3,00

Tabulka 35 Měření 6

Měření bylo provedeno pro různé vstupní parametry, přičemž některé z těchto parametrů mohou naznačit, zda jejich zvyšování či snižování má za následek změnu energetické náročnosti sušení. Při měřeních bylo měněno zejména zaplnění sušky. Hmotnost vsázky pro jedno měření se pohybovala přibližně v rozmezí 20–60 kg. Další významnou proměnnou byl vstupní obsah vody v sušené štěpce, který se pohyboval v rozmezí 60–70 %. Dále potom byly změny v otáčkách bubnu. Tyto parametry bylo potřeba vzít v úvahu.

	Zaplnění prostoru sušky [%]	Otáčky bubnu [min ⁻¹]
Měření č. 1	8,7	2,1
Měření č. 2	9,5	2,6
Měření č. 3	12,1	2,6
Měření č. 4	16,6	2,6
Měření č. 5	25,6	2,6
Měření č. 6	26,0	1,3

Tabulka 36 Zaplnění prostoru sušky a otáčky bubnu

Různé hmotnosti a obsahy vody ve štěpce ovlivňovaly zejména délku sušení. K tomu, aby bylo možné porovnávat jednotlivá měření z pohledu měrné plošné a objemové odpařivosti, bylo potřeba upravit výstupní data dle vztahů

$$o_s = \frac{\frac{m_w}{S}}{\frac{T}{60}} \left[\frac{kg}{m^2 \cdot h} \right] \quad (3.22)$$

$$o_v = \frac{\frac{m_w}{V}}{\frac{T}{60}} \left[\frac{kg}{m^3 \cdot h} \right], \quad (3.23)$$

kde T [min] je doba sušení (viz tabulka 37).

Těmito vztahy je získána měrná plošná a objemová odpařivost za jednu hodinu sušení. Z podkapitoly 2.3, sekce Průběh sušení, je zřejmé, že ve třetí fázi sušení dochází ke zpomalování sušení a současně je biomasa již dostatečně suchá pro efektivní spálení v kotli. Pokračování v sušení bude již tedy neekonomické, avšak dosažení této fáze je patrné na sušicí křivce až po určitém setrvání v tomto úseku. Pro získání přesnější hodnoty měrné plošné a objemové odpařivosti sušení byl z grafu odečten čas,

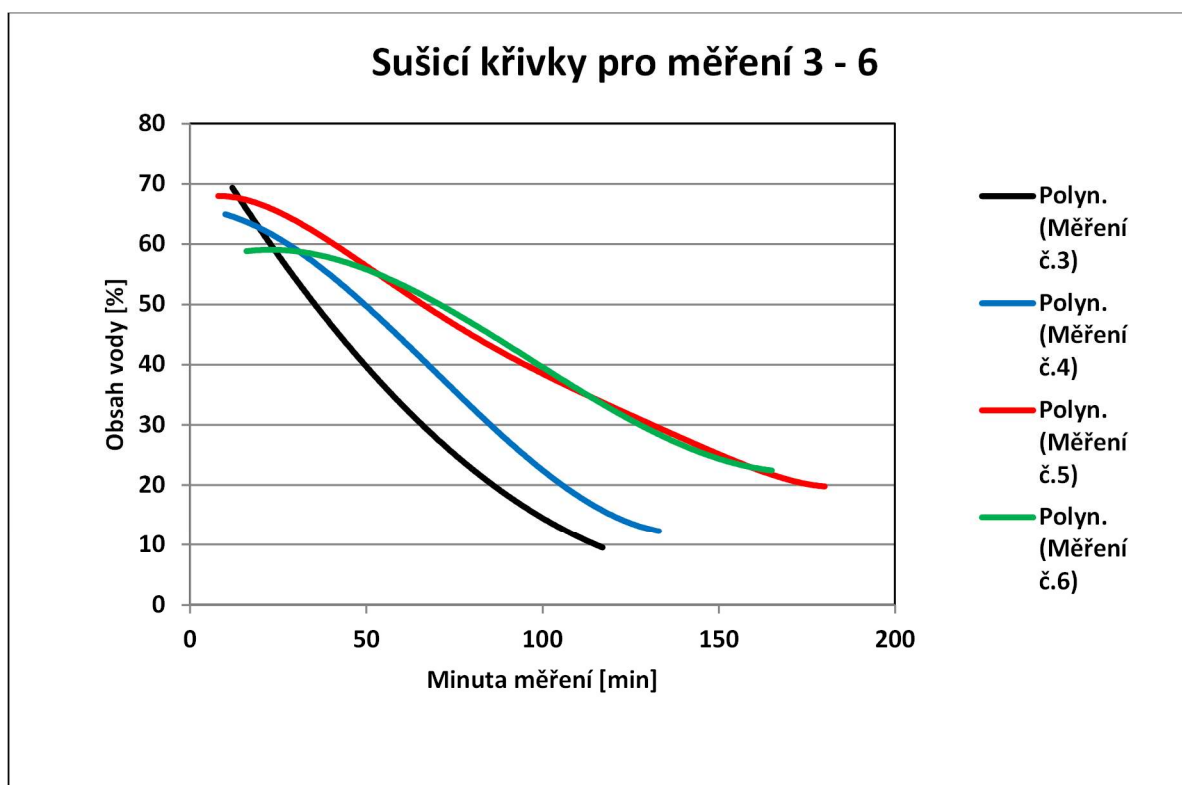
ve kterém došlo k přechodu z druhé do třetí fáze, a tento čas byl považován za ukončení sušení. Tabulka jednotlivých dob měření a sušení:

	Doba měření [min]	Doba sušení [min]
Měření č. 1	60	60
Měření č. 2	60	60
Měření č. 3	138	117
Měření č. 4	173	133
Měření č. 5	205	180
Měření č. 6	217	165

Tabulka 37 Doby měření a sušení

Sušicí křivky pro měření č. 3–6:

Na základě těchto měření bylo možné stanovit sušicí křivky pro 3.–6. měření. Význam sušicí křivky pro tuto práci byl zejména pro stanovení přechodu z 2. fáze sušení do 3. fáze (viz podkapitola 2.3, sekce Průběh sušení), a tedy stanovení minimální doby sušení. Data z měření byla proložena polynomy.



Obrázek 28 Sušicí křivky pro měření 3–6

Zhodnocení:

Pro názornost je přiložena souhrnná tabulka 38 s nejdůležitějšími parametry pro jednotlivá měření.

	Měrná plošná odpařivost [kg/m ² ·h]	Měrná objemová odpařivost [kg/m ³ ·h]	Energetická náročnost [MJ/kg _w]	Zaplnění sušky [%]
Měření č. 1	1,85	19,85	3,43	8,7
Měření č. 2	1,89	20,27	3,46	9,5
Měření č. 3	1,59	17,13	3,52	12,1
Měření č. 4	1,68	18,03	–	16,6
Měření č. 5	2,03	21,84	3,24	25,6
Měření č. 6	1,94	20,91	3,00	26,0

Tabulka 38 Souhrn ze všech měření

Z výše uvedených dat lze učinit některé závěry. Vyšší zaplnění bubny vede ke zvýšení měrné plošné a objemové odpařivosti. **Hodnota měrné plošné odpařivosti se pohybovala v rozmezí $o_s = 1,6 - 2 \left[\frac{kg}{m^2 \cdot h} \right]$.**



Obrázek 29 Závislost měrné plošné odpařivosti na zaplnění sušky

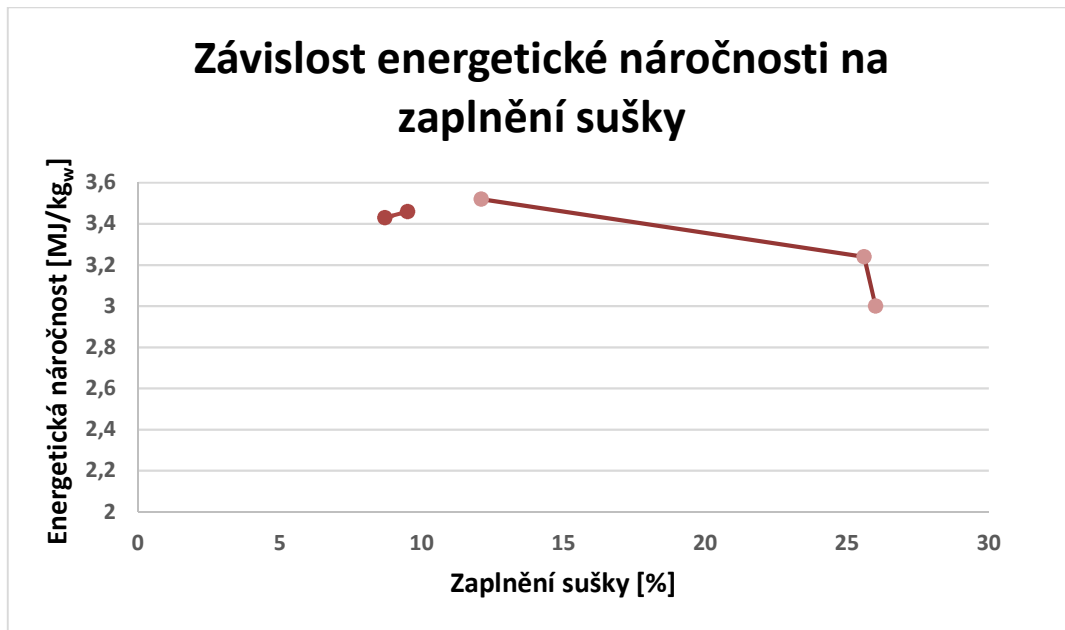
Hodnota měrné objemové odpařivosti byla v rozmezí $o_v = 17 - 22 \left[\frac{kg}{m^3 \cdot h} \right]$, čímž vyšší zaplnění, tím vyšší hodnota příslušné odpařivosti a současně delší doba sušení.



Obrázek 30 Závislost měrné objemové odpařivosti na zaplnění sušky

Dále lze předpokládat, že nižší otáčky bubny vedou ke snížení energetické náročnosti sušení, což je pravděpodobně dáno delší dobou setrvání biomasy v sušce, a tím menší ztrátou ochlazením biomasy mimo prostor sušky. U velkého zařízení, kde biomasa vystoupí suchá po jednom průchodu, by však pravděpodobně tento účinek opadl.

Energetická náročnost sušení se pohybovala v rozmezí $E = 3 - 3,5 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}_w} \right]$, s rostoucím zaplněním se energetická náročnost sušení snižuje (viz obrázek 31).



Obrázek 31 Závislost energetické náročnosti na zaplnění sušky

Měření č. 4 dosahuje hodnoty $E = 4,62 \text{ [MJ/kg}_w]$. Je možné, že došlo k chybě při měření, a toto měření proto bylo vyřazeno. Při teoretickém výpočtu vychází energetická náročnost:

$$E_{teor} = (i_{páry,100^\circ\text{C}} - i_{vody,25^\circ\text{C}}) + c_{su} \cdot (t_{100^\circ\text{C}} - t_{25^\circ\text{C}})$$

$$E_{teor} = (2675,6 - 104,8) + 1,45 \cdot (100 - 25)$$

$$E_{teor} = 2679,6 \text{ kJ/kg}$$

Je tedy nutné počítat s tím, že skutečná energetická náročnost je při optimálním zaplnění přibližně o 12 % vyšší.

Parametry pro odhad velikosti zařízení:

Měrná plošná odpařivost [kg/m ² ·h]	2
Měrná objemová odpařivost [kg/m ³ ·h]	22
Energetická náročnost [MJ/kg _w]	3

Tabulka 39 Parametry pro odhad velikosti zařízení

3.7 Účinnost oběhu po zohlednění ztráty sušky

Na základě dat získaných z měření je vidět, že energetická náročnost sušení je přibližně o 12 % vyšší. Z tohoto důvodu je přepočítána účinnost celého oběhu. Odběr pro odplynění zůstane zachován, ale změní se odběr pro sušku o 12 %.

Celkový odběr páry:

$$M_{celk} = 1,12 \cdot M_{01} + M_{02}$$

$$M_{celk} = 1,12 \cdot 0,7616 + 0,1347$$

$$M_{celk} = 0,9877 \text{ kg/s,}$$

kde M_{01} je odběr pro sušku a M_{02} je odběr pro odplynění.

Množství páry $M = 1,578 \text{ kg/s}$ získané spálením 1 kg biomasy zůstane nezměněno, stejně tak jako i příkon napájecího čerpadla $P_{N\check{c}} = 20,3 \text{ kW/kg}_{pv}$ a teoretický výkon VT dílu $P_{teorVT} = 1048,49 \text{ kW/kg}_{pv}$, avšak k poklesu výkonu dojde na NT dílu turbíny vlivem nižšího průtoku páry.

Teoretický výkon NT dílu:

$$P_{teorNT} = (M - M_{celk}) \cdot H_{adNT}$$

$$P_{teorNT} = (1,578 - 0,9877) \cdot 580,04$$

$$P_{teorNT} = 342,40 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Svorkový výkon:

$$P_{sv} = (P_{teorVT} + P_{teorNT}) \cdot \eta_{td} \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

$$P_{sv} = (1048,49 + 342,40) \cdot 0,84 \cdot 0,99 \cdot 0,98$$

$$P_{sv} = 1133,53 \text{ kW/kg}_{pv}$$

Výkon oběhu po vlastní spotřebě:

$$P_{VL,Sp}^{SS70\%} = P_{sv} - P_{N\check{c}}$$

$$P_{VL,Sp}^{SS70\%} = 1133,53 - 20,3$$

$$P_{VL,Sp}^{SS70\%} = 1113,23 \text{ kW/kg}_{pv}$$

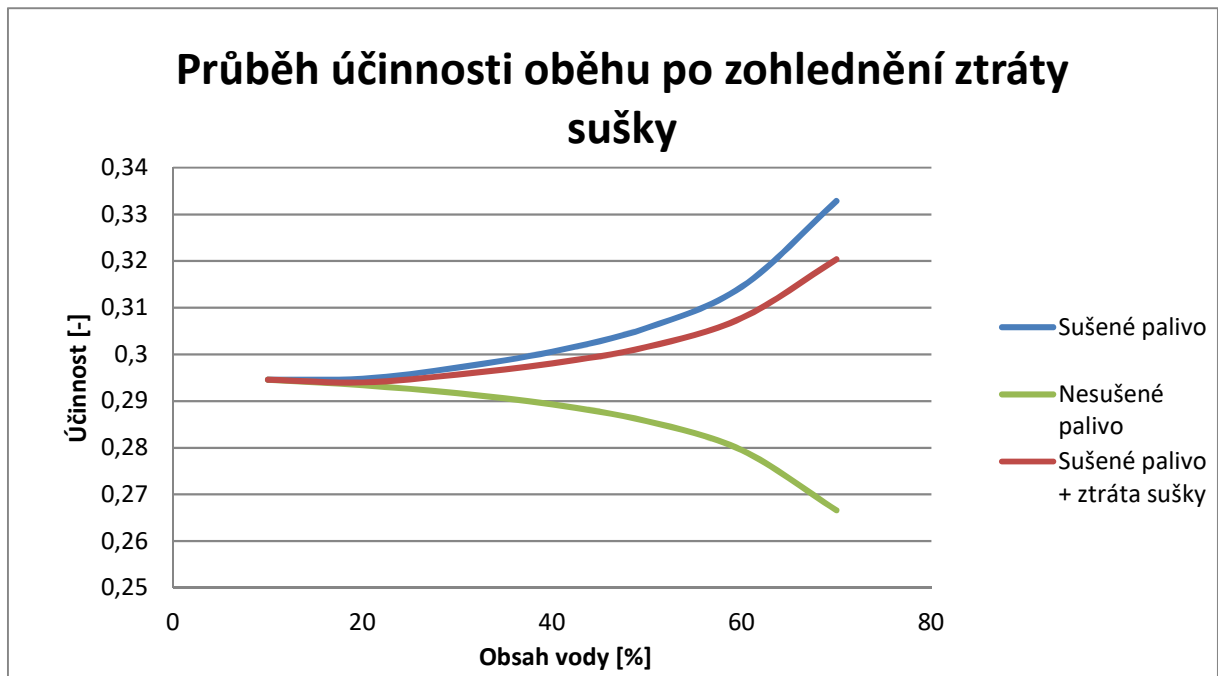
Účinnost oběhu po zohlednění ztráty sušky:

$$\eta_{celk}^{ssz70\%} = \frac{P_{sv} - P_{N\check{C}}}{M_{pv1} \cdot Q_{ired}} * 100$$

$$\eta_{celk}^{ssz70\%} = \frac{1133,53 - 20,3}{1 \cdot 3474} * 100$$

$$\eta_{celk}^{ssz70\%} = 32,04 \%$$

Ztráta sušky velmi nepříznivě ovlivňuje účinnost celého oběhu. Vlivem této ztráty dojde k poklesu účinnosti z $\eta_{celk}^{ssz70\%} = 33,29 \%$ na $\eta_{celk}^{ssz70\%} = 32,04 \%$.



Obrázek 32 Průběh účinnosti oběhu po zohlednění ztráty sušky

4) Ekonomické hodnocení

Na základě předchozích úvah bylo prokázáno, že suška integrovaná do oběhu vede ke zvýšení účinnosti celého oběhu. Zároveň byla z měření získána data pro vytvoření projekce provozních nákladů. V této kapitole je tedy třeba stanovit tyto provozní náklady, respektive úsporu provozních nákladů. Dále je nutné odhadnout velikost sušky pro stanovení investičních nákladů. Následně se musí vyhodnotit, zda úspora provozních nákladů převyší investiční náklady a stanovit prostou a diskontovanou dobu návratnosti.

4.1 Odhad velikosti a ceny zařízení

Ke kotli o jmenovitých parametrech $p_a = 6,7 \text{ MPa}$, $t_a = 490 \text{ }^\circ\text{C}$ jsou přiřazeny dva oběhy. První oběh je bez sušky a spaluje kvalitní biomasu s nízkým obsahem vody $W^{bs} = 10 \%$. Druhý je se suškou a do oběhu vstupuje velmi mokrá biomasa o obsahu vody $W^{ss} = 70 \%$. Sušku následně opouští biomasa o stejném obsahu vody a stejném hmotnostním toku jako v případě oběhu bez sušení. Oběh bez sušení bude spalovat výrazně dražší biomasu než oběh se sušením, ale tento oběh nedosáhne takového elektrického výkonu vlivem odběru páry pro sušku. Pro přibližný výkon $P = 10 \text{ MW}_e$ u oběhu bez sušení paliva je dopočítáno potřebné množství paliva pro oběh se suškou, tak aby byl zachován stejný hmotnostní tok a obsah vody biomasy vstupující do kotle. Z rozdílu hmotnostních toků paliva vstupujícího do oběhů je určeno množství vody k odpaření v sušce a stanovena velikost zařízení.

Nejdůležitější parametry:

- Elektrický výkon	$P = 10 MW_e$
- Výkon oběhu bez sušení paliva	$P_{VL,Sp}^{bs10\%} = 4452,11 kW_e/kg_{pv}$
- Výkon oběhu se sušením paliva	$P_{VL,Sp}^{ss70\%} = 1113,23 kW_e/kg_{pv}$
- Počáteční obsah vody v palivu	$W_1^r = 70 \%$
- Konečný obsah vody v palivu	$W_2^r = 10 \%$
- Měrná objemová odpařivost	$o_V = 22 kg/m^{-3} \cdot h$
- Měrná plošná odpařivost	$o_S = 2 kg/m^{-2} \cdot h$

Potřebné množství paliva:

Pro $P = 10 MW_e$ v oběhu bez sušení paliva se stanoví množství paliva z:

$$M_{pv}^{bs10\%} = \frac{P}{P_{VL,Sp}^{bs10\%}}$$

$$M_{pv}^{bs10\%} = \frac{10000}{4452,11}$$

$$M_{pv}^{bs10\%} = 2,2461 kg/s$$

Potřebné množství paliva v oběhu se sušením paliva:

Pro oběh se sušením paliva je dopočítáno potřebné množství paliva o $W_1^r = 70 \%$, tak aby obsah vody a hmotnostní tok paliva do kotle byl identický s oběhem bez sušení paliva.

$$M_{pv}^{ss70\%} = \frac{M_{pv}^{bs10\%}}{1 - \frac{W_1^r - W_2^r}{1 - W_2^r}}$$

$$M_{pv}^{ss70\%} = \frac{2,2461}{1 - \frac{0,7 - 0,1}{1 - 0,1}}$$

$$M_{pv}^{ss70\%} = 6,7383 kg/s$$

Množství vody, které je potřeba odpařit:

$$M_w = M_{pv}^{ss70\%} - M_{pv}^{bs10\%}$$

$$M_w = 6,7383 - 2,2461$$

$$M_w = 4,4922 \text{ kg/s}$$

Potřebný objem pro odpaření vody:

$$V = \frac{M_w * 3600}{o_v}$$

$$V = \frac{4,4922 * 3600}{22}$$

$$V = 735,09 \text{ m}^3$$

Potřebná plocha pro odpaření vody:

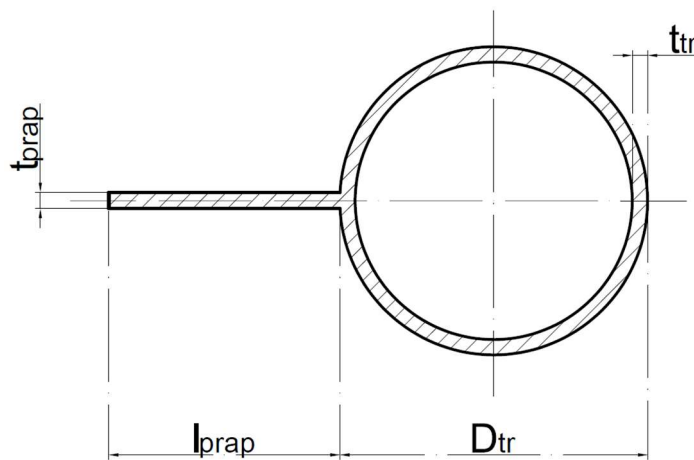
$$S = \frac{M_w * 3600}{o_s}$$

$$S = \frac{4,4922 * 3600}{2}$$

$$S = 8085,96 \text{ m}^2$$

Volba základních rozměrů sušky:

Nyní je potřeba navrhnout základní rozměry sušky, tak aby byly splněny minimální požadavky na objem a plochu zařízení. Plášť zařízení je tvořen otápenou membránovou stěnou a v případě potřeby doplněn o lopatky, které budou též tvořené membránovou stěnou. Tato stěna se skládá ze segmentů vytvořených z trubky a přivařeného praporku (viz obrázek 33).



Obrázek 33 Schéma segmentu

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| - Vnější průměr trubky | $D_{tr} = 0,08 \text{ m}$ |
| - Tloušťka stěny trubky | $t_{tr} = 0,006 \text{ m}$ |
| - Délka praporku | $l_{prap} = 0,06 \text{ m}$ |
| - Tloušťka praporku | $t_{prap} = 0,006 \text{ m}$ |
| - Délka membránové stěny | $L = 128 \text{ m}$ |
| - Počet segmentů | $N_{seg} = 80$ |

Výpočet středního průměru membránové stěny:

$$D_{mem.stěny} = \frac{N_{seg} \cdot (l_{prap} + D_{tr})}{\pi}$$

$$D_{mem.stěny} = \frac{80 \cdot (0,06 + 0,08)}{\pi}$$

$$D_{mem.stěny} = 3,56507 \text{ m}$$

Výpočet objemu prostoru sušky bez lopatek:

$$V_{sušky} = \left(\frac{\pi \cdot D_{mem.stěny}^2}{4} - N_{seg} \cdot \frac{\pi \cdot D_{tr}^2}{2 \cdot 4} \right) \cdot L$$

$$V_{sušky} = \left(\frac{\pi \cdot 3,56507^2}{4} - 80 \cdot \frac{\pi \cdot 0,08^2}{2 \cdot 4} \right) \cdot 128$$

$$V_{sušky} = 1251,99 \text{ m}^3$$

Výpočet plochy membránové stěny uvnitř sušky:

$$S_{sušky} = N_{seg} \cdot \left(l_{pr} + \frac{\pi \cdot D_{tr}}{2} \right) \cdot L$$

$$S_{sušky} = 80 \cdot \left(0,06 + \frac{\pi \cdot 0,08}{2} \right) \cdot 128$$

$$S_{sušky} = 1901,20 \text{ m}^2$$

Z předchozích výpočtů vyplývá, že objem válce je dostatečný, avšak plocha membránové stěny nepostačuje pro dosažení požadované měrné plošné odpařivosti, proto je třeba dodat další otápané plochy. Jako otápané plochy poslouží lopatky tvořené obdobnými segmenty jako v případě membránové stěny.

- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| - Vnější průměr trubky | $d_{tr} = 0,04 \text{ m}$ |
| - Tloušťka stěny trubky | $t_{tr} = 0,004 \text{ m}$ |
| - Délka praporku | $l_{prap} = 0,06 \text{ m}$ |
| - Tloušťka praporku | $t_{prap} = 0,004 \text{ m}$ |
| - Šířka lopatky | $L = 128 \text{ m}$ |
| - Počet segmentů | $N_{seg} = 10$ |
| - Počet lopatek | $N_{lop} = 20$ |

Výpočet plochy lopatky:

$$S_{lop} = (\pi \cdot d_{tr} + 2 \cdot l_{prap}) \cdot L \cdot N_{seg}$$

$$S_{lop} = (\pi \cdot 0,04 + 2 \cdot 0,06) \cdot 128 \cdot 10$$

$$S_{lop} = 314,45 \text{ m}^2$$

Výpočet objemu lopatky:

$$V_{lop} = \left(\frac{\pi \cdot d_{tr}^2}{4} + l_{prap} \cdot t_{prap} \right) \cdot L \cdot N_{seg}$$

$$V_{lop} = \left(\frac{\pi \cdot 0,04^2}{4} + 0,06 \cdot 0,004 \right) \cdot 128 \cdot 10$$

$$V_{lop} = 1,916 \text{ m}^3$$

Výpočet celkové odpařovací plochy:

$$S_{celk} = S_{sušky} + N_{lop} \cdot S_{lop}$$

$$S_{celk} = 1901,20 + 20 \cdot 314,45$$

$$S_{celk} = 8190,20 \text{ m}^2$$

Výpočet celkového odpařovacího objemu:

$$V_{celk} = V_{sušky} - N_{lop} \cdot V_{lop}$$

$$V_{celk} = 1251,99 - 20 \cdot 1,916$$

$$V_{celk} = 1213,67 \text{ m}^3$$

Navržené zařízení splňuje minimální požadavky na odpařovací objem a plochu. Vzhledem k přepravnímu omezení, kde maximální přepravitelný průměr rotoru je okolo $D_{mem.stěny} = 3,56507 \text{ m}$, nelze dosáhnout lepšího poměru mezi celkovým objemem a plochou.

Výpočet hmotnosti membránové stěny:

Použitý materiál pro celé zařízení je konstrukční ocel s hustotou $\rho = 7850 \frac{kg}{m^3}$.

$$m_{mem.stěny} = (l_{prap} \cdot t_{prap} + \pi \cdot (D_{tr} - t_{tr}) \cdot t_{tr}) \cdot N_{seg} \cdot L \cdot \rho$$

$$m_{mem.stěny} = (0,06 \cdot 0,006 + \pi \cdot (0,08 - 0,006) \cdot 0,006) \cdot 80 \cdot 128 \cdot 7850$$

$$m_{mem.stěny} = 141063 \text{ kg}$$

Výpočet hmotnosti lopatky:

$$m_{lop} = (l_{prap} \cdot t_{prap} + \pi \cdot (d_{tr} - t_{tr}) \cdot t_{tr}) \cdot N_{seg} \cdot L \cdot \rho$$

$$m_{lop} = (0,06 \cdot 0,004 + \pi \cdot (0,04 - 0,004) \cdot 0,004) \cdot 10 \cdot 128 \cdot 7850$$

$$m_{lop} = 6957,13 \text{ kg}$$

Výpočet hmotnosti rotoru:

$$m_{rot} = m_{mem.stěny} + N_{lop} \cdot m_{lop}$$

$$m_{rot} = 141063 + 20 \cdot 6957,13$$

$$m_{rot} = 280206 \text{ kg}$$

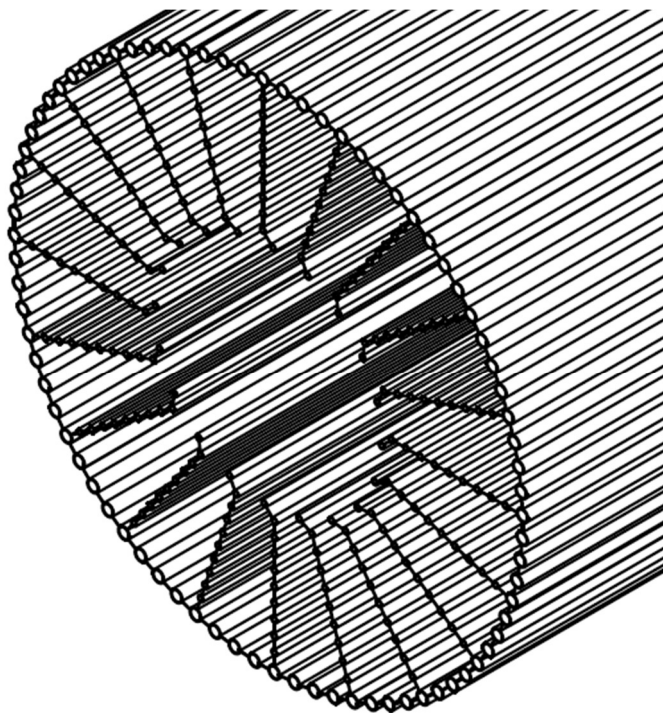
Výpočet celkové hmotnosti sušky:

Na základě konzultace s vedoucím práce je hmotnost konstrukce sušky kvalifikovaně odhadnuta ve výši 20 % hmotnosti rotoru. Celková hmotnost sušky je dána vztahem

$$m_{sušky} = 1,2 \cdot m_{rot}$$

$$m_{sušky} = 1,2 \cdot 280206$$

$$m_{sušky} = 336247 \text{ kg.}$$

Vnitřní prostor sušky:

Obrázek 34 Uspořádání lopatek v sušce

Protože suška je příliš dlouhá a nebylo by ji možné přepravit, je suška rozdělena na 6 dílů, kdy každý díl bude mít délku $L_i = 21,33m$.

Odhad ceny zařízení:

Na základě konzultace s vedoucím práce je cena sušky odhadnuta pomocí koeficientu zohledňujícího náklady na materiál a jeho následné přepracování. Koeficient je kvalifikovaně odhadnut ve výši $K_p = 300 \text{ Kč/kg}$. Cena zařízení bude současně sloužit i jako celkové investiční náklady.

$$IN_{sušky} = \frac{K_p \cdot m_{sušky}}{1000000}$$

$$IN_{sušky} = \frac{300 \cdot 336247}{1000000}$$

$$IN_{sušky} = 100,87 \text{ mil. Kč}$$

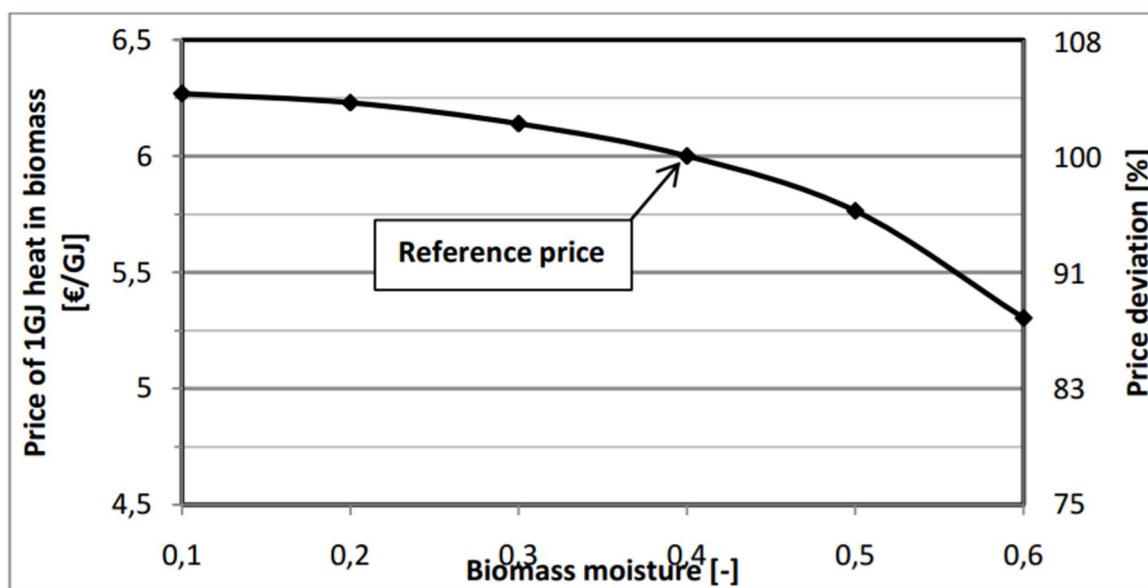
4.2 Provozní výsledek

Protože je suška přiřazována ke stávajícímu oběhu s kotlem o příslušném parním výkonu, je zřejmé, že vlivem odběru páry pro vytápění sušky poklesne množství páry protékající NT dílem turbíny, a tím i výkon turbíny. Na druhou stranu získáme možnost spalovat palivo s nižší cenou za GJ tepla. Provozní výsledek bude stanoven jako rozdíl mezi uspořenými náklady v palivu a ztrátou výkonu na turbíně vlivem odběru pro sušku. Provozní výsledek je tedy silně závislý na ceně biomasy. Pokud by cena byla příliš nízká, úspora by mohla být nižší než ztráta zisku z prodané elektrické energie. Naopak při nízkých výkupních cenách elektrické energie by mohly být palivové náklady vyšší než tržby z prodeje elektrické energie.

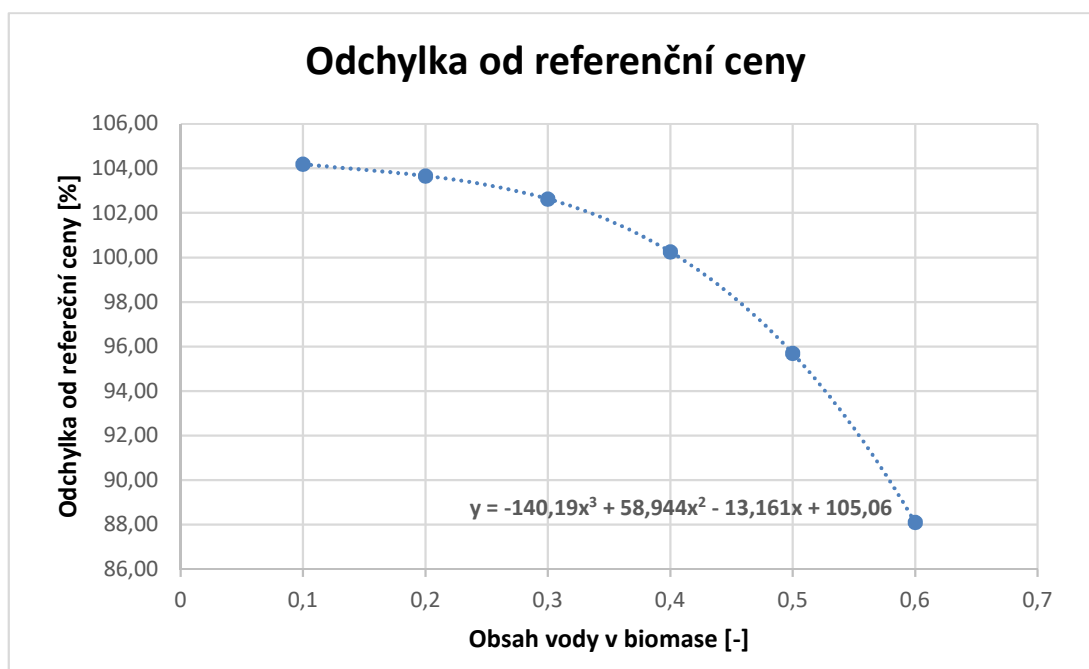
4.2.1 Cena paliva a úspora v palivu

Ceny paliva se mohou zásadně měnit podle druhu spalované biomasy, lokality a vlivem nabídky a poptávky. Tento parametr je mimořádně důležitý a je třeba ho důsledně vyhodnotit při každé případné realizaci. Obecně lze říci, že cena paliva se odvíjí od výhřevnosti paliva. Při výhřevnosti $8 \text{ GJ}/\text{tunu}$, kdy tato výhřevnost odpovídá obsahu vody přibližně 50 % (viz tabulka 3), se cena bude pohybovat okolo $110 \text{ Kč}/\text{GJ}$. Při výhřevnosti okolo $14 \text{ GJ}/\text{tunu}$ je obsah vody okolo 20 % (viz tabulka 3) a cena se může pohybovat okolo $150 \text{ Kč}/\text{GJ}$. [25]

Vzhledem k tomu, že celá práce je zaměřena na sušení velmi mokré biomasy s obsahem vody okolo 70 %, je třeba odhadnout cenu za GJ při tomto obsahu. Výpočet vychází z teorie [26], která zohledňuje snížení účinnosti reálného kotle při změně paliva oproti návrhovému.



Obrázek 35 Závislost ceny tepla v biomase na obsahu vody [26]



Obrázek 36 Odchylka od referenční ceny [26]

Obrázek 36 byl doplněn k obrázku 35 za účelem získání závislosti odchylky od referenční ceny na obsahu vody v biomase, tak aby bylo možné odhadnout cenu za 1 GJ tepla při obsahu vody 70 %. Dosazením do dané závislosti tuto odchylku získáme a následně upravíme, protože uvedená referenční cena je vztažena k 40% obsahu vody a nalezené výkupní ceny byly vztaženy k 50 %. Poté je možné dopočítat odpovídající cenu. Uvedená závislost ne zcela odpovídá tržní ceně paliva. Pokud bychom ji použili pro dopočtení ceny paliva při 20% obsahu vody, dospěli bychom k nižší částce, než se ve skutečnosti obchoduje, avšak pro hrubý odhad bude tato závislost dostačující.

Výpočet odchylky pro 70% obsah vody:

$$y = -140,74 \cdot x^3 + 59,563 \cdot x^2 - 13,351 \cdot x + 105,07$$

$$y = -140,74 \cdot 0,7^3 + 59,563 \cdot 0,7^2 - 13,351 \cdot 0,7 + 105,07$$

$$y = 76,64 \%$$

Obsah vody [-]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Odchylka [%]	104,19	103,66	102,63	100,25	95,69	88,10	76,64

Tabulka 40 Odchylky od referenční hodnoty 0,4

Drobná odchylka u hodnoty 0,4 od 100 % je dána aproximací polynomem 3. stupně.

Korekce referenčního obsahu vody:

Odchytky z tabulky 40 se převedou na desetinná čísla a vydělí odchylkou pro 0,5.

Obsah vody [-]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Odchylka [%]	104,19	103,66	102,63	100,25	95,69	88,10	76,64
Odchylka [-]	1,0419	1,0366	1,0263	1,0025	0,9569	0,881	0,7664
Zkorigovaná Odchylka [-]	1,09	1,08	1,07	1,05	1	0,92	0,8

Tabulka 41 Zkorigovaná odchylka pro obsah vody 0,5

Výsledná odchylka oproti ceně za GJ při 50% obsahu vody je $y^{50\%} = 0,8$.

Odhad ceny paliva:

Z uvedených 110 Kč za GJ tepla při obsahu vody 50 % bude odhadnuta cena paliva s obsahem vody 70 % a následně dopočítána cena za tunu paliva. Palivo při 70% obsahu vody má výhřevnost cca $Q_i^r = 3390 \text{ kJ/kg}$ (viz tabulka 11).

$$p_{GJ}^{70\%} = p_{GJ}^{50\%} \cdot y^{50\%}$$

$$p_{GJ}^{70\%} = 110 \cdot 0,8$$

$$p_{GJ}^{70\%} = 88 \text{ Kč/GJ}$$

Cena za tunu paliva se vypočte jako násobek ceny za GJ a výhřevnost daného paliva.

$$P_{pv}^{70\%} = p_{GJ}^{70\%} \cdot \frac{Q_i^r}{1000}$$

$$P_{pv}^{70\%} = 88 \cdot \frac{3390}{1000}$$

$$P_{pv}^{70\%} = 298,32 \text{ Kč/tuna}$$

Odhad ceny za tunu paliva při obsahu vody 70 % je přibližně 300 Kč.

4.2.2 Výkupní cena elektrické energie

Výroba elektrické energie z biomasy patří mezi podporované zdroje energie. Výše podpory je závislá na druhu spalované biomasy a způsobu výroby elektrické energie. Současně je ovšem patrné, že podpora se s každým novým cenovým rozhodnutím snižuje.

ř./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		Kategorie biomasy a proces využití	Jednotarifní pásmo provozování	
		od (včetně)	do (včetně)		Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
	a	b	c	k	l	m
200	Výroba elektřiny společným spalováním biomasy a různých zdrojů energie s výjimkou komunálního odpadu	-	31. 12. 2017	S1	3100*	2 440
201		-	31. 12. 2017	S2	1960*	1 300
202		-	31. 12. 2017	S3	760*	100
203		-	31. 12. 2017	P1	3370*	2 710
204		-	31. 12. 2017	P2	2230*	1 570
205		-	31. 12. 2017	P3	1030*	370
206		-	31. 12. 2017	DS1	3100*	2 440
207		-	31. 12. 2017	DS2	1960*	1 300
208		-	31. 12. 2017	DS3	760*	100
209		-	31. 12. 2017	DP1	3370*	2 710
210		-	31. 12. 2017	DP2	2230*	1 570
211	-	31. 12. 2017	DP3	1030*	370	
230	Výroba elektřiny spalováním komunálního odpadu nebo společným spalováním komunálního odpadu s různými zdroji energie	1. 1. 2016	31. 12. 2017	-	1720*	1 060
240	Výroba elektřiny spalováním čisté biomasy	-	31. 12. 2007	O1	3 900	3 240
241		-	31. 12. 2007	O2	3 200	2 540
242		-	31. 12. 2007	O3	2 530	1 870
243	Výroba elektřiny spalováním čisté biomasy ve stávajících výrobnách	-	31. 12. 2012	O1	2 830	2 170
244		-	31. 12. 2012	O2	2 130	1 470
245		-	31. 12. 2012	O3	1 460	800
260	Výroba elektřiny spalováním čisté biomasy v nových výrobnách elektřiny nebo zdrojích	1. 1. 2008	31. 12. 2012	O1	4 580	3 920
261		1. 1. 2008	31. 12. 2012	O2	3 530	2 870
262		1. 1. 2008	31. 12. 2012	O3	2 630	1 970
263		1. 1. 2013	31. 12. 2013	O1	3 730	3 070
264		1. 1. 2013	31. 12. 2013	O2	2 890	2 230
265		1. 1. 2013	31. 12. 2013	O3	2 060	1 400
266		1. 1. 2014	31. 12. 2014	O1	3 335	2 675
267		1. 1. 2014	31. 12. 2014	O2	2 320	1 660
268		1. 1. 2014	31. 12. 2014	O3	1 310	650
269		1. 1. 2015	31. 12. 2017	O1	3 263	2 603
270		1. 1. 2015	31. 12. 2017	O2	2 251	1 591
271	1. 1. 2015	31. 12. 2017	O3	1 245	585	

* Výkupní cena je pouze informativní a není možné ji nárokovat, viz § 12 odst. 2 zákona č. 165/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů

Tabulka 42 Výkupní ceny a zelené bonusy na elektřinu vyrobenou z biomasy [27]

Výkupní cena elektrické energie je silně závislá na druhu spalované biomasy. Na kotel spalující čistou biomasu a uvedený do provozu mezi 1. 1. 2015 až 31. 12. 2017 (viz řádky 269 až 271 tabulky 42) připadají kategorie O1, O2 a O3.

Do kategorie O1 patří cíleně pěstované plodiny a dřeviny určené primárně k energetickému využití. Tato kategorie má i nejvyšší výkupní cenu, a to ve výši 3263 *Kč/MWh*. Do kategorie O2 patří sláma, znehodnocené potravinářské zrno, biopaliva, kaly, zbytková dřevní hmota, kůra atd. Elektrická energie vyrobená z této kategorie se vykupuje za 2251 *Kč/MWh*. Kategorie O3 zahrnuje zejména piliny, hobliny a další vedlejší produkty vznikající při zpracování dřeva. Výkupní cena v této kategorii je nejnižší, a to 1245 *Kč/MWh*. [28]

Vzhledem k tomu, že výkupní ceny neustále klesají, bude ekonomická část doplněna o citlivostní analýzu, která pomůže stanovit cenové rozpětí, ve kterém je provozování sušky výhodné.

4.2.3 Výnosy a náklady

Pro zvolenou dobu využití zdroje $\tau_v = 8000 \text{ hod/rok}$ je možné se znalostí spotřeby, ceny paliva a prodejní ceny elektrické energie stanovit ekonomické přínosy sušky.

Parametry:

- Cena mokrého paliva	$P_{pv}^{70\%} = 300 \text{ Kč/tunu}$
- Cena suchého paliva	$P_{pv}^{10\%} = 2260 \text{ Kč/tunu}$
- Výkupní cena elektrické energie	$P_{el} = 3,2K \text{ č/kWh}$
- Spotřeba paliva bez sušky	$M_{pv}^{bs10\%} = 2,2461 \text{ kg/s}$
- Spotřeba paliva se suškou	$M_{pv}^{ss70\%} = 6,7383 \text{ kg/s}$
- Výkon oběhu bez sušení paliva	$P_{vl,Sp}^{bs10\%} = 4452,11 \text{ kW}_e/\text{kg}$
- Výkon oběhu se sušením paliva	$P_{vl,Sp}^{ss70\%} = 1113,23 \text{ kW}_e/\text{kg}$
- Doba využití zdroje	$\tau_v = 8000 \text{ hod/rok}$

Palivové náklady v oběhu bez sušení paliva:

$$C_{pv}^{bs10\%} = \frac{M_{pv}^{bs10\%} \cdot \tau_v \cdot 3600}{1000000} \cdot \frac{P_{pv}^{10\%}}{1000}$$

$$C_{pv}^{bs10\%} = \frac{2,2461 \cdot 8000 \cdot 3600}{1000000} \cdot \frac{2260}{1000}$$

$$C_{pv}^{bs10\%} = 146,19 \text{ mil. Kč/rok}$$

Palivové náklady v oběhu se sušením paliva:

$$C_{pv}^{ss70\%} = \frac{M_{pv}^{ss70\%} \cdot \tau_v \cdot 3600}{1000000} \cdot \frac{P_{pv}^{70\%}}{1000}$$

$$C_{pv}^{ss70\%} = \frac{6,7383 \cdot 8000 \cdot 3600}{1000000} \cdot \frac{300}{1000}$$

$$C_{pv}^{ss70\%} = 58,22 \text{ mil. Kč/rok}$$

Úspora v palivových nákladech:

$$U_{pv} = C_{pv}^{bs10\%} - C_{pv}^{ss70\%}$$

$$U_{pv} = 146,19 - 58,22$$

$$U_{pv} = 87,97 \text{ mil. Kč/rok}$$

Výnosy získané z prodeje elektrické energie v oběhu bez sušení paliva:

$$R_{el}^{bs10\%} = \frac{M_{pv}^{bs10\%} \cdot P_{vl,sp}^{bs10\%} \cdot D_v \cdot P_{el}}{1000000}$$

$$R_{el}^{bs10\%} = \frac{2,2461 \cdot 4452,11 \cdot 8000 \cdot 3,2}{1000000}$$

$$R_{el}^{bs10\%} = 255,99 \text{ mil. Kč/rok}$$

Výnosy získané z prodeje elektrické energie v oběhu se sušením paliva:

$$R_{el}^{ss70\%} = \frac{M_{pv}^{ss70\%} \cdot P_{vl,sp}^{ss70\%} \cdot D_v \cdot P_{el}}{1000000}$$

$$R_{el}^{ss70\%} = \frac{6,7383 \cdot 1113,23 \cdot 8000 \cdot 3,2}{1000000}$$

$$R_{el}^{ss70\%} = 192,03 \text{ mil. Kč/rok}$$

Rozdíl ve výnosech z elektrické energie:

$$D_{el} = R_{el}^{ss70\%} - R_{el}^{bs10\%}$$

$$D_{el} = 192,03 - 255,99$$

$$D_{el} = -63,96 \text{ mil. Kč/rok}$$

Cashflow:

$$CF_t = U_{pv} + D_{el}$$

$$CF_1 = 87,97 - 63,96$$

$$CF_1 = 24,01 \text{ mil. Kč/rok}$$

4.3 Prostá doba návratnosti

$$T_s = \frac{IN_{sušky}}{CF_1}$$

$$T_s = \frac{100,87}{24,01}$$

$$T_s = 4,2 \text{ let}$$

Při uvažovaných parametrech ceny paliva a výkupní ceny elektrické energie by se investice navrátila za 4,2 let, což je při uvažované životnosti stroje 20 let velmi dobrý výsledek.

4.4 Diskontovaná doba návratnosti

Diskontovaná doba návratnosti má oproti prosté době návratnosti výhodu v tom, že zohledňuje čas, avšak klade vysoké nároky na odhad diskontní sazby, která silně ovlivňuje výsledek. Pro uvažovaný investiční horizont $T = 20 \text{ let}$ je vypracován ekonomický model s následujícími předpoklady.

Předpoklady:

- Míra inflace $i = 3 \%$
- Bezriziková investice $nr = 2 \%$
- Prémie za riziko $b = 3 \%$
- Míra zdražování $g = 3 \%$

Diskontní sazba:

$$r = \frac{i + nr + b}{100}$$

$$r = \frac{3 + 2 + 3}{100}$$

$$r = 0,07$$

Diskontované cashflow:

$$DCF_t = \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

$$DC_1 = \frac{24,01}{(1+0,7)^1}$$

$$DC_1 = 22,44 \text{ mil. Kč}$$

Rok	0	1	2	10	11	20
Ceba paliva mokré [Kč/kg]	0	0,300	0,309	0,391	0,403	0,526
Ceba paliva suché [Kč/kg]	0	2,260	2,328	2,949	3,037	3,963
Cena elektrické energie [Kč/kWh]	0	3,200	3,296	4,175	4,301	5,611
Rozdíl v tržbách [mil.Kč]	0,00	-63,96	-65,88	-83,46	-85,96	-112,16
Úspora v palivu [mil.Kč]	0,00	87,98	90,61	114,79	118,23	154,27
Investice [mil.Kč]	-100,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CF [mil.Kč]	0,00	24,01	24,73	31,33	32,27	42,10
DCF [mil.Kč]	-100,87	22,44	21,60	15,93	15,33	10,88

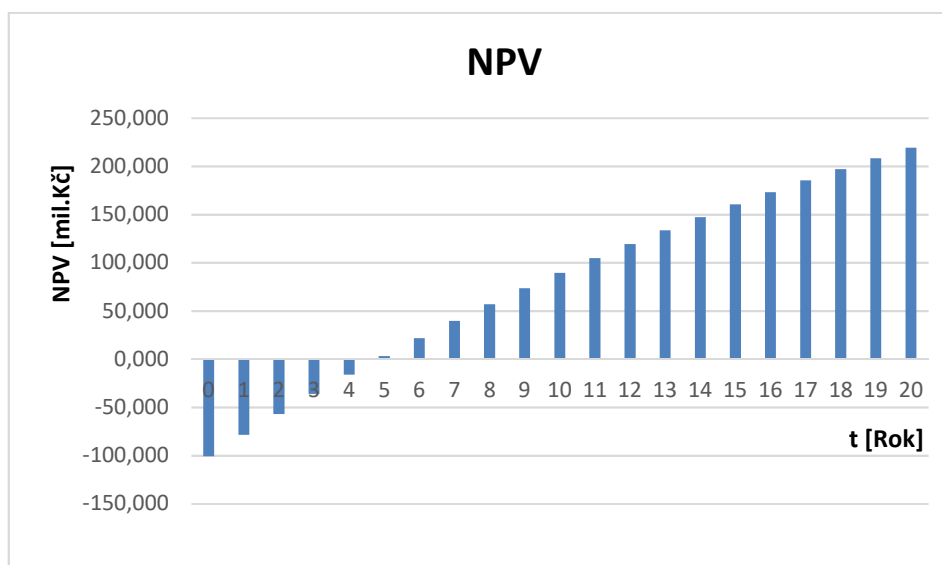
Tabulka 43 Výsledky pro vybrané roky

Celá tabulka je uvedena v příloze.

NPV:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

$$NPV = 219,23 \text{ mil. Kč}$$



Obrázek 37 Čistá současná hodnota

Diskontovaná doba návratnosti:

Z grafu lze jednoduše odečíst diskontovanou dobu návratnosti, která za daných předpokladů bude činit přibližně 4,8 let.

4.5 Citlivostní analýza

Vzhledem k tomu, že tato práce používá odhady, je doplněna o citlivostní analýzu, tak aby bylo možné stanovit vliv jednotlivých předpokladů na ekonomiku sušky. Jeden z volených parametrů bude vždy měněn v rozmezí $\pm 30\%$, zbývající parametry zůstanou konstantní. Bude sledován vliv na NPV. V citlivostní analýze budou postupně měněny investiční náklady, výkupní cena elektrické energie a cena paliva.

Investiční náklady:

Odchylka Investičních nákladů [%]	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30
Investiční náklady [mil.Kč]	70,61	80,7	90,79	100,87	110,96	121,05	113,13
NPV [mil.Kč]	249,49	239,4	229,32	219,23	209,14	199,05	188,97
Odchylka NPV [%]	13,8	9,2	4,6	0,0	-4,6	-9,2	-13,8

Tabulka 44 Vliv změny investičních nákladů na NPV

Vliv investičních nákladů není až tak veliký, 30% odchylka v investičních nákladech způsobí odchylku v NPV ve výši 13,8 %. Nízký vliv investičních nákladů je dán zejména vysokou výnosností investice. Pokud by se změnil i další parametr, např. cena paliva nebo elektrické energie tak, že by klesla výnosnost, vliv investičních nákladů by byl citelnější.

Výkupní cena elektrické energie:

Odchylka výkupní ceny elektřiny [%]	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30
Výkupní cena elektřiny [Kč]	2,24	2,56	2,88	3,2	3,52	3,84	4,16
NPV [mil.Kč]	475,06	389,78	304,51	219,23	133,96	48,68	-36,59
Odchylka NPV [%]	116,7	77,8	38,9	0,0	-38,9	-77,8	-116,7

Tabulka 45 Vliv změny výkupní ceny elektrické energie na NPV

Vzhledem k tomu, že oba uvažované oběhy mají stejný parní výkon, ale oběh se sušením paliva má odběr páry pro sušku, a tedy i nižší výkon na turbíně, nastává zde situace, že pokles ceny elektrické energie může vést k růstu NPV a naopak růst ceny

k jeho poklesu. Nelze říct, že čím nižší cena, tím lépe, protože při velmi nízké výkupní ceně elektrické energie cca $P_{el} < 1 \text{ Kč/kWh}$ by palivové náklady byly vyšší než tržby z prodeje elektrické energie. Naopak při velmi vysoké výkupní ceně elektrické energie $P_{el} > 4,4 \text{ Kč/kWh}$ by úspora nákladů nevykompenzovala ztrátu na tržbách z prodeje elektrické energie. Z tabulky 45 je zřejmé, že vliv výkupní ceny elektrické energie je velmi silný, 10% odchylka výkupní ceny způsobí 38,9% odchylku v NPV.

Cena paliva:

Odchylka výkupní ceny elektřiny [%]	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30
Cena suchého paliva [Kč]	1,582	1,808	2,034	2,26	2,486	2,712	2,938
NPV [mil.Kč]	-365,47	-170,57	24,33	219,23	414,13	609,03	803,93
Odchylka NPV [%]	-266,7	-177,8	-88,9	0,0	88,9	177,8	266,7

Tabulka 46 Vliv změny ceny suchého paliva na NPV

S klesající cenou suchého paliva, respektive cenou za GJ, by se snižoval cenový rozdíl mezi suchou a mokrou biomasou, a tím i ekonomický přínos sušky. Změna ceny suchého paliva má nejsilnější vliv na výsledné NPV, pouhá 10% odchylka ceny způsobí 88,9% odchylku v NPV. Vzhledem k tomu, že přínos sušky je vyhodnocován jako rozdíl nákladů na suché palivo použité v oběhu bez sušky a mokré palivo použité v oběhu se suškou, povede růst ceny pouze suchého paliva vždy ke kladnému přínosu v NPV, avšak reálně by pravděpodobně rostly obě ceny současně, a vliv by tedy byl nižší.

Odchylka výkupní ceny elektřiny [%]	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30
Cena mokrého paliva [Kč]	0,21	0,24	0,27	0,3	0,33	0,36	0,39
NPV [mil.Kč]	452,08	374,46	296,85	219,23	141,62	64,00	-13,62
Odchylka NPV [%]	106,2	70,8	35,4	0,0	-35,4	-70,8	-106,2

Tabulka 47 Vliv změny ceny mokrého paliva na NPV

Tento vliv je též velmi významný, nikoli však tolik jako v případě suché biomasy, nicméně opět se dá předpokládat, že by obě ceny rostly současně.

5) Závěr

Integrace sušky do oběhu parní teplárny jednoznačně vede ke zvýšení účinnosti celého oběhu. Přínos sušky je tím větší, čím je větší vstupní obsah vody. Po integraci sušky do oběhu, který teoreticky spaluje biomasu s obsahem vody 70 %, došlo ke zvýšení účinnosti oběhu z $\eta_{celk}^{bs70\%} = 26,66 \%$ na $\eta_{celk}^{ssz70\%} = 32,04 \%$, tedy o více než 5 procentních bodů. Další výhodou integrace sušky je možnost spalovat palivo s obsahem vody vyšším než 55 %, které by bylo jinak nespalitelné.

Výsledkem měření na experimentální sušce bylo i zjištění ztráty sušky, která byla okolo 12 %, nicméně velkou část z této ztráty tvořila ztráta ochlazením biomasy v době, kdy byla mimo sušku. V sušce navržené pro konkrétní oběh by tato ztráta byla minimalizována, protože by biomasa byla vysušena při jediném průchodu. Při sušení biomasy vzniká i velké množství brýdové páry, která v sobě skrývá další potenciál, například předsoušení biomasy nebo využití v regeneračním ohříváku napájecí vody, který by mohl dále zlepšit ekonomiku sušky.

Investice do sušky je velmi výnosná – při uvažovaných parametrech v této práci se navrátí za 4,8 let – avšak výnosnost je silně závislá na ceně paliva a výkupní ceně elektrické energie. Pokud dojde ke změně ceny suché biomasy o 10 %, celkové NPV se změní o 88,9 %, v případě mokré biomasy pak o 35,4 %; pokud dojde ke změně výkupní ceny elektrické energie o 10 %, způsobí to změnu NPV o 38,9 %. Lze předpokládat, že pokud by rostla cena suchého paliva, poroste i cena mokrého paliva, a výsledné NPV by bylo otázkou poměru mezi cenou paliva a výkupní cenou elektrické energie.

Citovaná literatura

- [1] HORÁK, J. *Úvod do teorie spalování tuhých paliv*.
<http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/spalovani-tuhych-paliv.pdf>. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2011.
- [2] DLOUHÝ, T. *Spalování a kotle*. http://energetika.cvut.cz/?en_spalovani-a-kotle,109. Praha: ČVUT, 2011.
- [3] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02591-8.
- [4] ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEYSSLER, J. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983. L12-E1-IV-41/22601.
- [5] PASTOREK, Z., KÁRA, J., JEVIČ, P. *Biomasa obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC PUBLIC, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [6] HRDLIČKA, J. *Biomasa – charakteristika, specifika, obecné vlastnosti*. Praha: neznámý nakladatel, 2015.
- [7] HRDLIČKA, J. *Biomasa – biomasa jako palivo*. Praha: neznámý nakladatel, 2015.
- [8] JANÁČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H. *Vybrané statě z procesního inženýrství*.
<http://www.utb.cz/file/42263/>. Zlín: UTB, 2013.
- [9] HASAL, P. a kol. *Chemické inženýrství I*. Praha: VŠCHT Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-002-7.
- [10] ČEZ. *Elektrárny ČEZ spalující biomasu*. <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa/elektrarny-cez-spalujici-biomasu.html>. Praha: ČEZ, 2017.
- [11] ENERGETICKÉ CENTRUM. *Výroba elektřiny a tepla z biomasy*.
<http://www.ecjh.cz/cze/o-nas.html>. Jindřichův Hradec: EC, 2017.

- [12] PROCESS ENGINEERING. *Scottish project marks RWE's biggest investment in biomass power*. <http://processengineering.theengineer.co.uk/scottish-project-marks-rwes-biggest-investment-in-biomass-power/1000801.article>. Berkhamsted: Synthesis Media, 2010.
- [13] RWE. *Biomass power plant HKW Kehl*. <http://www.rwe.com/web/cms/en/65992/rwe-innogy/technologies/biomass-power-plant-hkw-kehl-gmbh/>. Essen: RWE, 2017.
- [14] EPROPLAN. *Kehl*. http://www.eproplan.de/fileadmin/archiv/seiten/Aktuelles/0124x_d-light_291111_1_.jpg. Stuttgart: Eproplan, 2017.
- [15] RWE. *Bergkamen biomass fired power plant*. <http://www.rwe.com/web/cms/en/87050/rwe-innogy/sites/power-from-biomass/germany/bergkamen-biomass-fired-power-plant/>. Essen: RWE, 2017.
- [16] AET-BIOMASS. *Engie Cofely, SODC Orleans, France*. <http://www.aet-biomass.com/en-GB/Home/References/Biomass-Fired-Plants/Cofely-SODC-Orleans.aspx>. Aalborg: AET-Biomass, 2017.
- [17] AET-BIOMASS. *Cofely SODC Orleans*. <http://www.aet-biomass.com/en-GB/Home/References/Biomass-Fired-Plants/Cofely-SODC-Orleans.aspx>. Aalborg: AET-Biomass, 2017.
- [18] AET-BIOMASS. *Zignago power, Italy*. <http://www.aet-biomass.com/en-GB/Home/References/Biomass-Fired-Plants/Zignago-Power.aspx>. Aalborg: AET-Biomass, 2017.
- [19] AET-BIOMASS. *Zignago power plant*. <http://aet-biomass.de/admin/public/getimage.aspx?Image=/Files/Images/About/Values/zignago-power-plant.jpg&width=1000>. Aalborg: AET-Biomass, 2017.
- [20] SMRČKA, V., BECHNÍK, B. *Plzeň má největší zdroj energie z biomasy*. <http://oze.tzb-info.cz/biomasa/6516-plzen-ma-nejvetsi-zdroj-energie-z-biomasy>. Praha: Topinfo, 2010.

- [21] INVELT. *Kotle na spalování biomasy typu BF*.
http://www.invelt.cz/media/soubory/downloads/servis/prospekt_biomasa.pdf. Plzeň: Invelt, 2017.
- [22] IDNES.CZ. *Inženýrské stavby – kotelna na biomasu Plzeňské teplárenské*.
http://plzen.idnes.cz/foto.aspx?r=plzen-zpravy&c=A110526_093652_plzen-zpravy_alt&foto=ALT3a7596_biomasa_teplarenska.jpg. Praha: MAFRA, 2017.
- [23] DASHÖFER. *Tepelné vlastnosti dřeva*.
http://www.dashofer.cz/download/pdf/drv/2_5_1_tepelne_vlastnosti_dreva.pdf. Praha: Dashöfer, 2009.
- [24] SABATINI, M. *Fotografie z měření*. Praha: vlastním nákladem, 2016.
- [25] JAPOL. *Jak se dá zobchodovat štěpka a dřevo z japonského topolu*.
<http://www.japonskytopol-prodej.cz/japonsky-topol/jak-se-da-zobchodovat-stepka-a-drevo-z-japonskeho-topolu/>. Prostějov: Japol, 2017.
- [26] HAVLÍK, J., DLOUHÝ, T. Evaluation of moist biomass. *Holistic approach to environment*. 2015, roč. 2, č. 5, s. 71–76. <http://www.cpo.hr/Paper%2080.pdf>. Zagreb: Association for promotion of holistic approach to environment, 2015. ISSN 1848-0071.
- [27] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 11/2016*.
http://www.eru.cz/documents/10540/2824549/161222_CR_11_2016.pdf/e54c452d-3a5d-45c2-b756-ee6aa81bcaa6. Praha: Energetický regulační úřad, 2016.
- [28] MZČR. *Vyhláška č. 482/2005 Sb., o stanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy*.
<http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/tematicky-prehled/100076292.html>. Praha: MZČR, 2005.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Výhřevnost a spálené teplo v závislosti na vlhkosti řízků [7]	17
Obrázek 2 Schéma přenosu hmoty při sušení [8].....	19
Obrázek 3 Průběh sušení (průběhy vlhkosti, teploty a rychlosti sušení) [8]	20
Obrázek 4 Kontinuální fluidační suška [9]	22
Obrázek 5 Rotační bubnová suška a tři ukázky vestavby bubnu [9]	23
Obrázek 6 Rozprašovací suška [9].....	24
Obrázek 7 Komorová vsádková suška [9]	25
Obrázek 8 Proudová pneumatická suška [9].....	26
Obrázek 9 Lopatková suška [9]	27
Obrázek 10 Energetické centrum Jindřichův Hradec [11]	28
Obrázek 11 Teplárna Kehl [14].....	29
Obrázek 12 Elektrárna Bergkamen [15]	30
Obrázek 13 Teplárna The Orléans [17]	31
Obrázek 14 Teplárna Zignago [19].....	32
Obrázek 15 Teplárna v Plzni [22]	33
Obrázek 16 Závislost výhřevnosti na obsahu vody v palivu	39
Obrázek 17 Účinnost kotle v závislosti na obsahu vody v palivu.....	54
Obrázek 18 Schéma oběhu parní elektrárny bez sušky	55
Obrázek 19 Bilance odplynováku	56
Obrázek 20 Schéma oběhu se suškou.....	60
Obrázek 21 Bilance sušky	61
Obrázek 22 Bilance odplynováku	62
Obrázek 23 Průběh účinností oběhů	65
Obrázek 24 Experimentální suška [24].....	66
Obrázek 25 Měřený vzorek štěpky [24].....	68
Obrázek 26 Horkovzdušná suška [24].....	68
Obrázek 27 Štěpka mokrá vlevo, suchá vpravo [24]	69
Obrázek 28 Sušicí křivky pro měření 3–6.....	75
Obrázek 29 Závislost měrné plošné odpařivosti na zaplnění sušky	76
Obrázek 30 Závislost měrné objemové odpařivosti na zaplnění sušky	77
Obrázek 31 Závislost energetické náročnosti na zaplnění sušky	78

Obrázek 32 Průběh účinnosti oběhu po zohlednění ztráty sušky	80
Obrázek 33 Schéma segmentu	84
Obrázek 34 Uspořádání lopatek v sušce	88
Obrázek 35 Závislost ceny tepla v biomase na obsahu vody [26]	90
Obrázek 36 Odchylka od referenční ceny [26]	91
Obrázek 37 Čistá současná hodnota	98

Seznam tabulek

Tabulka 1 Podíl prchavé hořlaviny [1]	14
Tabulka 2 Porovnání různých druhů biomasy a hnědého uhlí [5]	16
Tabulka 3 Výhřevnost pro různé obsahy vody [5]	17
Tabulka 4 Energetické centrum Jindřichův Hradec [10]	28
Tabulka 5 Teplárna Kehl [12]	29
Tabulka 6 Elektrárna Bergkamen [12]	30
Tabulka 7 Teplárna The Orléans [16]	31
Tabulka 8 Teplárna Zignago [18]	32
Tabulka 9 Plzeňská teplárna [20] a [21]	33
Tabulka 10 Různé varianty admisních parametrů a příslušných suchostí	34
Tabulka 11 Přepočet paliva pro různý vstupní obsah vody W_r	39
Tabulka 12 Výsledky z (3.12) až (3.15) pro různé obsahy vody	41
Tabulka 13 Objemy jednotlivých složek spalin pro různé obsahy vody	42
Tabulka 14 Minimální objemy suchých a vlhkých spalin pro různé obsahy vody	43
Tabulka 15 Objem spalin z 1 kg paliva při spalování s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,5$	43
Tabulka 16 Měrné tepelné kapacity paliva pro různé obsahy vody	45
Tabulka 17 Fyzické teplo paliva pro různé obsahy vody	45
Tabulka 18 Redukovaná výhřevnost pro různé obsahy vody	46
Tabulka 19 Podíl spalitelných látek v tuhých zbytcích [3]	47
Tabulka 20 Bilance popela [3]	47
Tabulka 21 Ztráta Z_c pro různé obsahy vody	48
Tabulka 22 Ztráta chemickým nedopalem Z_{co} pro různé obsahy vody	49
Tabulka 23 Ztráta sdílením tepla do okolí Z_{sv} pro různé obsahy vody	49

Tabulka 24 Ztráta Zf pro různé obsahy vody.....	51
Tabulka 25 Entalpie složek spalin	52
Tabulka 26 Entalpie spalin o dané teplotě a přebytku vzduchu.....	53
Tabulka 27 Komínová ztráta Zk pro různé obsahy vody	53
Tabulka 28 Účinnost kotle pro různé obsahy vody	53
Tabulka 29 Rozměry sušky a parametry topného média	70
Tabulka 30 Měření 1	71
Tabulka 31 Měření 2	71
Tabulka 32 Měření 3	72
Tabulka 33 Měření 4	72
Tabulka 34 Měření 5	73
Tabulka 35 Měření 6	73
Tabulka 36 Zaplnění prostoru sušky a otáčky bubnu	74
Tabulka 37 Doby měření a sušení.....	75
Tabulka 38 Souhrn ze všech měření.....	76
Tabulka 39 Parametry pro odhad velikosti zařízení.....	78
Tabulka 40 Odchyly od referenční hodnoty 0,4	91
Tabulka 41 Zkorigovaná odchylna pro obsah vody 0,5	92
Tabulka 42 Výkupní ceny a zelené bonusy na elektřinu vyrobenou z biomasy [27] ..	93
Tabulka 43 Výsledky pro vybrané roky.....	98
Tabulka 44 Vliv změny investičních nákladů na NPV	99
Tabulka 45 Vliv změny výkupní ceny elektrické energie na NPV	99
Tabulka 46 Vliv změny ceny suchého paliva na NPV.....	100
Tabulka 47 Vliv změny ceny mokrého paliva na NPV	100

Seznam příloh

Příloha 1 Diskontované cashflow v jednotlivých letech.....	108
--	-----

Přílohy

Diskontované cashflow v jednotlivých letech:

Rok	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ceba paliva mokré [Kč/kg]	0	0,300	0,309	0,318	0,328	0,338	0,348	0,358	0,369	0,380	0,391
Ceba paliva suché [Kč/kg]	0	2,26	2,328	2,398	2,470	2,544	2,620	2,699	2,780	2,863	2,949
Cena elektrické energie [Kč/kWh]	0	3,200	3,296	3,395	3,497	3,602	3,710	3,821	3,936	4,054	4,175
Rozdíl v tržbách [mil.Kč]	0,00	-63,96	-65,88	-67,86	-69,90	-71,99	-74,15	-76,38	-78,67	-81,03	-83,46
Úspora v palivu [mil.Kč]	0,00	87,98	90,61	93,33	96,13	99,02	101,99	105,05	108,20	111,44	114,79
Investice [mil.Kč]	-100,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CF [mil.Kč]	0,00	24,01	24,73	25,47	26,24	27,02	27,84	28,67	29,53	30,42	31,33
DCF [mil.Kč]	-100,87	22,44	21,60	20,79	20,02	19,27	18,55	17,85	17,19	16,54	15,93

Rok	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ceba paliva mokré [Kč/kg]	0,403	0,415	0,428	0,441	0,454	0,467	0,481	0,496	0,511	0,526
Ceba paliva suché [Kč/kg]	3,037	3,128	3,222	3,319	3,418	3,521	3,627	3,735	3,847	3,963
Cena elektrické energie [Kč/kWh]	4,301	4,430	4,562	4,699	4,840	4,985	5,135	5,289	5,448	5,611
Rozdíl v tržbách [mil.Kč]	-85,96	-88,54	-91,20	-93,93	-96,75	-99,65	-102,64	-105,72	-108,89	-112,16
Úspora v palivu [mil.Kč]	118,23	121,78	125,43	129,19	133,07	137,06	141,17	145,41	149,77	154,27
Investice [mil.Kč]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CF [mil.Kč]	32,27	33,24	34,23	35,26	36,32	37,41	38,53	39,69	40,88	42,10
DCF [mil.Kč]	15,33	14,76	14,21	13,67	13,16	12,67	12,20	11,74	11,30	10,88