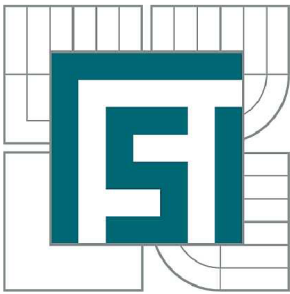


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## PARNÍ KOTEL NA BIOMASU

BIOMASS STEAM-BOILER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

GERGELY SZABÓ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN LISÝ, Ph.D.

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/14

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Gergely Szabó

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Parní kotel na biomasu**

v anglickém jazyce:

### **Biomass Steam-Boiler**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popište stavbu a základní charakteristiku biomasového parního kotle se zaměřením na provozní a regulační specifika.

Cíle bakalářské práce:

Popis stavby parního biomasového kotle

Popis funkce jednotlivých částí

Základní popis regulace parního kotle

Seznam odborné literatury:

Černý, Janeba, Teysler: Parní kotle, Technický průvodce č. 72

Dlouhý: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ISBN 978-80-0103757-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Lisý, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 19.11.2013



*J. Pospíšil*

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

*J. Katolický*

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



## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je odbornou rešerší zabývající se parním kotlem na biomasu. Hlavním cílem práce je popis stavby, funkce jednotlivých částí a regulace kotle. První část práce je věnována kotlům obecně, představuje typy paliva, zaměří se na kotle spalující tuhá paliva a popisuje parní generátor kotlů. Druhá část práce se zabývá konkrétním parním biomasovým kotlem, popisuje jeho hlavní části a pojednává o regulačních obvodech kotle.

## **Abstract**

This bachelor's thesis is a professional research dealing with a biomass steam boiler. The main aim of the thesis is the description of the structure, the function of individual parts and the regulation of the boiler. The first part of the thesis is devoted to boilers in general, presents their fuels, focuses on solid fuel-fired boilers and describes the steam generator of boilers. The second part deals with a specific biomass steam boiler, describes its main parts and discusses the regulation circuits of the boiler.

## **Klíčová slova**

parní kotel, biomasa, tuhá paliva, roštové kotle, spalovací zařízení, tlakový systém, regulační obvod

## **Keywords**

steam boiler, biomass, solid fuels, grate boilers, combustion apparatus, pressure system, regulation circuit



## **Bibliografická citace**

SZABÓ, G. *Parní kotel na biomasu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Parní kotel na biomasu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních pramenů, které jsou uvedeny v příloženém seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne 30.5.2014

---

Gergely Szabó



## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat především rodině, která mne po celou dobu studia a vypracování bakalářské práce podporovala. Obzvlášť bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za odborné vedení při zpracování bakalářské práce.





# Obsah

1 Úvod .....	15
2 Kotle .....	16
2.1 Rozdělení kotlů.....	16
2.2 Parametry kotlů.....	17
3 Rozdělení paliv .....	18
3.1 Paliva tuhá.....	18
3.1.1 Druhy tuhých paliv.....	18
3.1.2 Hrubý rozbor tuhých paliv .....	18
3.1.3 Výhřevnost tuhých paliv .....	19
3.2 Paliva kapalná .....	20
3.3 Paliva plynná.....	20
4 Kotle na tuhá paliva.....	21
4.1 Kotle roštové.....	21
4.1.2 Struktura a tvar roštového ohniště.....	21
4.1.1 Funkce a druhy roštů .....	22
4.1.3 Podávání a spalování paliva .....	23
4.2 Kotle fluidní .....	24
4.3 Kotle práškové .....	24
5 Výměníková část kotlů .....	25
5.1 Ohřívák vody .....	25
5.2 Výparný systém .....	25
5.3 Přehřívák páry.....	26
6 Parní kotel na biomasu .....	27
6.1 Charakteristika kotle .....	27
6.1.1 Technická data.....	27
6.1.2 Palivo a spaliny .....	28
6.1.3 Stavba a provoz.....	29
6.2 Zařízení kotle .....	31
6.2.1 Spalovací zařízení .....	31
6.2.2 Tlakový systém .....	32
6.2.3 Ostatní části.....	35

7 Regulační obvody parního kotle na biomasu.....	37
7.1 Regulační obvody kotle v systému voda – pára.....	38
7.1.1 Regulace hladiny vody v parním bubnu.....	38
7.1.2 Regulace tlaku vody na napájecím ventilu.....	38
7.1.3 Regulace teploty páry na výstupu z kotle.....	39
7.1.4 Regulace parního výkonu kotle.....	40
7.1.5 Regulace množství odluhu z kotle.....	40
7.1.6 Regulace pH kotelní vody.....	41
7.2 Regulační obvody kotle v systému spalování.....	41
7.2.1 Regulace spalovacího výkonu kotle.....	41
7.2.2 Regulace množství spalovacího vzduchu.....	41
7.2.3 Regulace teploty spalin na výstupu z kotle.....	42
7.2.4 Regulace podtlaku spalin ve spalovací komoře.....	43
8 Závěr.....	44
9 Seznam použitých zdrojů.....	45
10 Seznam použitých zkratk.....	46
11 Seznam použitých symbolů.....	46
12 Seznam obrázků.....	47
13 Seznam tabulek.....	47

# 1 Úvod

Elektrická energie se v domácnostech začala využívat koncem 19. století, což znamenalo vznik energetického strojírenství. Toto nové odvětví průmyslu zahrnuje výrobu parních kotlů, parních strojů a parních turbín pro výrobu elektrické energie. Spolu s rozvojem elektrárenství se rozvíjí i teplárenství. Rychle rostoucí spotřeba elektrické a tepelné energie vyvolávají neustálý vývoj konstrukcí parních kotlů, zejména vzrůst parního výkonu, intenzity spalování, přenosu tepla přes výhřevné plochy, zlepšení spolehlivosti a hospodárnosti parních kotlů. Význam fosilních zdrojů energie se zvyšuje a lidská společnost se stává závislou na něm. Postupně vzniká problém z toho, že zásoby ropy, zemního plynu a uhlí jsou vyčerpateľné, kromě toho spalování fosilních paliv má negativní efekt na životní prostředí. V důsledku toho od druhé poloviny 20. století stále roste využívání obnovitelných zdrojů, jako například energie vodní, sluneční, větrná, geotermální a spalování biopaliv. Díky všeobecné podpoře energetického využívání biomasy, v poslední době docházelo k velkému rozmachu vývoje a použití parních kotlů spalujících biomasu.

## 2 Kotle

*Parní kotel* je zařízení k výrobě páry z pracovního média pomocí tepla, která se získává spalováním paliva. V parním kotli se odehrávají dva děje hlavní, a to transformace chemické energie paliva na tepelnou energii spalin a přenos tepla ze spalin do pracovního média, jímž je dnes obvykle voda.

Parní kotel obecně sestává ze dvou částí:

- spalovací zařízení s příslušenstvím: ohniště, hořáky, rošt, zařízení k přípravě a dávkování paliva, zařízení k odstraňování zbytků po spalení, ohřívák vzduchu, ventilátory vzduchu a spalin,
- tlakový systém kotle: ohřívák vody (ekonomizér), výparný systém (výparník), přehřívák páry, přihřívák páry, napájecí nádrž, oběhová čerpadla, kondenzátor, úpravna vody.

Dále je součástí parního kotle celá řada armatur a přístrojů pro měření, regulaci a zajišťování bezpečného a bezporuchového provozu.

*Teplovodní a horkovodní kotle* jsou zařízení na účely otopné, používají se v soustavách centrálního vytápění. V podstatě jsou to modifikované parní kotle redukované na ohřívák vody, bez výparníku a přehříváku. Teplovodní kotel ohřívá vodu maximálně na 110 °C, v horkovodním kotli se voda ohřívá nad 110 °C [2].

### 2.1 Rozdělení kotlů

Podle použití rozeznáváme kotle:

- elektrárenské - slouží k výrobě páry pro turbínu,
- teplárenské - slouží k výrobě páry pro turbínu i pro vytápění,
- výtopenké - slouží pro ohřev vody,
- spalovenské (ve spalovnách odpadů),
- utilizační (na odpadní teplo),
- pro dopravní účely (lokomotivní, lodní).

Podle použitého paliva jsou kotle:

- na paliva tuhá,
- na paliva kapalná,
- na paliva plynná.

Kotle na tuhá paliva se dělí na:

- roštové,
- fluidní,
- práškové (granulační nebo výtavné).

Podle pracovního média rozeznáváme kotle jednolátkové a dvoulátkové.

Podle způsobu odpařování rozeznáváme kotle s přímým a s nepřímým odparem.

Podle proudění vody jsou kotle s relativně velkým a s relativně malým obsahem vody.

Kotle s relativně velkým obsahem vody se dělí na:

- válcové,
- plamencové,
- žárotrubné,
- kombinované.

Kotle s relativně malým obsahem vody se dělí na:

- s přirozeným oběhem vody,
- s nuceným oběhem vody,
- průtočné.

Podle tlaku rozeznáváme kotle:

- nízkotlaké (do 0,07 MPa),
- středotlaké (do 6,4 MPa),
- vysokotlaké (do 22,5 MPa),
- s nadkritickým tlakem (nad 22,5 MPa).

Podle způsobu zatížení jsou kotle:

- špičkové,
- pološpičkové,
- základní.

## 2.2 Parametry kotlů

Charakteristické parametry parního kotle [2]:

- *jmenovitý výkon* je hmotnostní průtok páry na výstupu z kotle, kterého musí kotel dosáhnout v trvalém provozu při dodržení jmenovitých hodnot základních parametrů (tlak, teplota páry, teplota napájecí vody) při spalování projektovaného paliva,
- *jmenovitý tlak*,
- *jmenovitá teplota páry*,
- *nejvyšší tlak páry* je roven nejnižšímu otevíracímu tlaku pojistného ventilu na přehříváku, resp. přihříváku,
- *nejvyšší teplota páry* je nejvyšší trvale přípustná hodnota,
- *konstrukční přetlak* je nejvyšší hodnota přetlaku syté páry při nejvyšším tlaku a jmenovité výkonnosti,
- *jmenovitá teplota napájecí vody*,
- *druh a vlastnosti paliva*,
- *způsob proudění vody v kotli*.

Základní parametry a výkony pro parní kotle jsou uvedeny v normě ČSN 07 0010, jež má však pouze doporučující charakter.

## 3 Rozdělení paliv

Teplu v kotlech se získává spalováním paliva. Jak již bylo zmíněno, kotle můžeme rozdělit podle typu paliva, např. na základě skupenství paliva:

- tuhá,
- kapalná,
- plynná.

Podle původu rozeznáváme paliva:

- fosilní (uhlí, ropa, zemní plyn),
- obnovitelné (biomasa),
- odpadní (odpadní plyny, komunální a průmyslové odpady, kaly z čistíren odpadních vod).

Dále se dělí na primární (záměrně těžená) a sekundární (odpadní).

### 3.1 Paliva tuhá

Světově nejužívanější tuhé palivo je uhlí (černé, hnědé), umělá uhelná paliva (koks, brikety) a v poslední době vzrůstá význam biomasy a odpadního paliva.

#### 3.1.1 Druhy tuhých paliv

*Uhlí* se rozděluje podle geologického stáří na rašelinu, lignit, hnědé uhlí, černé uhlí a antracit (od nejmladšího po nejstarší). Geologicky mladší paliva se snadněji zapalují, hoří delším plamenem za relativně nižších spalovacích teplot. Čím je uhlí geologicky starší, tím má obvykle vyšší spalné teplo, výhřevnost a menší prchavý podíl hořlaviny.

*Umělá uhelná paliva* jako koks a brikety mají relativně dobrou výhřevnost.

*Biomasa* patří mezi obnovitelné zdroje energie. Je to hmota organického původu. Rozeznáváme biomasu živočišného a rostlinného původu. Energeticky využitelná biomasa se dělí na záměrně pěstovanou a na odpadní biomasu. Důležitým parametrem biomasy je vlhkost, co má velký vliv na výhřevnost paliva. Obsah popelovin je u biopaliv velmi nízký.

*Odpadní paliva* jsou především komunální a průmyslové odpady. Při špatném režimu spalování odpadního paliva mohou vzniknout toxické látky.

#### 3.1.2 Hrubý rozbor tuhých paliv

Hrubým rozbohem se určuje složení tuhých paliv, při němž se stanoví poměr mezi hořlavinou ( $h$ ), popelovinou ( $A^r$ ) a vodou ( $W^r$ ) obsažených v palivu. Platí [1]:

$$h + A^r + W^r = 100\%$$

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

Obr. 1 Hrubý rozbor uhlí [5]

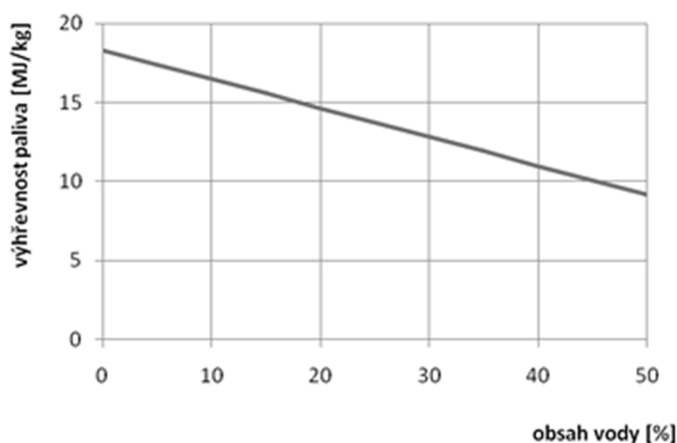
*Voda* v palivu je nežádoucí, protože snižuje výhřevnost paliva, při spalování snižuje spalovací teplotu, zvětšuje objem spalin, dále zvyšuje komínovou ztrátu a při poklesu teploty spalin pod hranici rosného bodu urychluje korozi kotle ze strany spalin.

*Popelovinu* tvoří minerální látky obsažené v tuhém palivu, její spálením vzniká popel. Částičky popela se usazují na teplosměnných plochách, vytvářejí nánosy a zhoršují přenos tepla v kotli. Vlivem popela se méně ochlazují spaliny, roste komínová ztráta a popel v palivu ztěžuje přístup kyslíku k hořlavině.

*Hořlavina* paliva je nositelem tepla uvolněného spalováním. Prchavá hořlavina je důležitou částí hořlaviny, která se uvolňuje při začátku spalování a napomáhá vznícování paliva v ohništi a stabilizuje spalovací proces. Podíl prchavé hořlaviny má vliv na ideální tvar roštového ohniště a na dimenzování množství spalovacího vzduchu (viz kapitola 4.1.2).

### 3.1.3 Výhřevnost tuhých paliv

Výhřevnost je nejdůležitější energeticko-ekonomickou vlastností paliva. Je to teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi. Výhřevnost paliva silně závisí na jeho obsahu vody (Obr. 2).



Obr. 2 Závislost výhřevnosti paliva na obsahu vody[5]

### **3.2 Paliva kapalná**

Základní surovina pro výrobu kapalných paliv používaných v energetice je ropa. Destilací ropy se získávají frakce různého bodu varu. Hrubý rozbor kapalných paliv ukazuje, že v palivu silně převládá hořlavina, zatímco obsah vody a popelovin je zanedbatelný.

### **3.3 Paliva plynná**

Plynná paliva jsou plyny s obsahem hořlavé složky. Mohou být přírodního původu, uměle vyráběna, nebo vzniklá jako odpadní produkt při technologických procesech.



## 4 Kotle na tuhá paliva

Jak již bylo zmíněno, kotle na tuhá paliva můžeme rozdělit podle typu ohniště:

- roštové (spalování v pevné vrstvě)
- fluidní (spalování paliva ve fluidní vrstvě)
- práškové (spalování uhelného prášku)

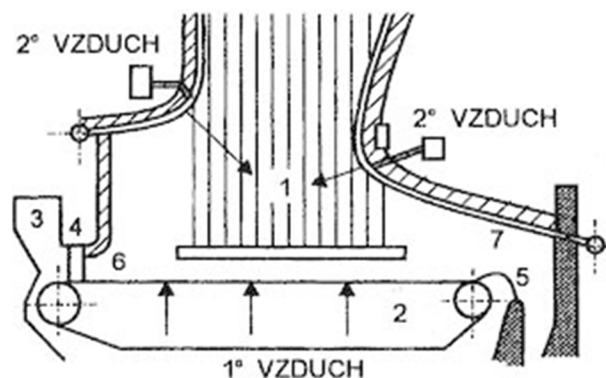
### 4.1 Kotle roštové

V současné době se nové roštové kotle se staví zejména pro spalování biomasy a pro spalování komunálních a průmyslových odpadů. Používají se v průmyslu i při vytápění domácností. Vyznačují se poměrně velkým množstvím škváry, až 60-70 % všech tuhých zbytků [6].

#### 4.1.2 Struktura a tvar roštového ohniště

Struktura roštového ohniště je zobrazena na Obr. 3:

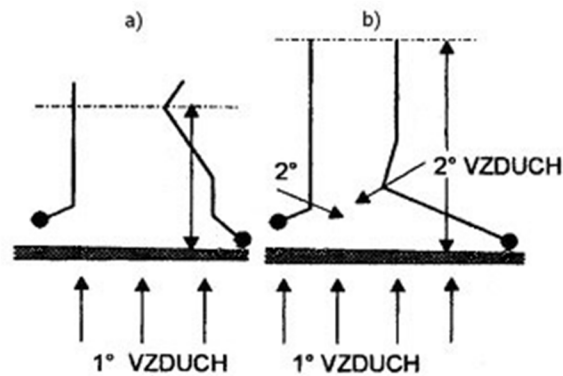
Ohniště (1) je ohraničeno roštem (2), přední klenbou (6), zadní klenbou (7) a stěnami ohniště. Palivo se na rošt dostává ze zásobníku (3) přes hradítko výšky paliva na rošt (4). Škvára odchází přes škvárový jízek (5) do škvárové výsypky.



Obr. 3 Základní části roštového ohniště [6]

Spalování v roštových ohništích probíhá ve vrstvě na roštu i v prostoru ohniště nad vrstvou paliva. Čím větší bude obsah prchavé hořlaviny v palivu, tím větší bude podíl hoření složek paliva v prostoru. Z tohoto důvodu rozeznáváme dvě základní konstrukční koncepce [1]:

- roštové ohniště s jedním ohniskem hoření (Obr. 4a) – pro paliva s nízkým obsahem prchavé hořlaviny (černé uhlí, antracit) – spalování probíhá na roštu, minimální podíl sekundárního vzduchu, ohniště je nižší, širší a s krátkou zadní klenbou,
- roštové ohniště s dvěma ohnisky hoření (Obr. 4b) – pro paliva s vysokým podílem prchavé hořlaviny (rašelina, hnědé uhlí, biomasa, odpady) – spalování probíhá na roštu i v prostoru nad roštem, větší podíl sekundárního vzduchu, ohniště je vysoká, má dlouhou zadní klenbu a bývá seškrčené.



Obr. 4 Tvar ohniště roštového kotle a) s jedním ohniskem a b) s dvěma ohnisky hoření [6]

#### 4.1.1 Funkce a druhy roštů

Funkce roštu při spalování [2]:

- vytvářet a udržovat vrstvu paliva požadované tloušťky a prodyšnosti při co nejmenším propadu zrn paliva,
- zajišťovat přívod spalovacího vzduchu do jednotlivých míst plochy roštu tak, aby spalování probíhalo s optimálním součinitelem přebytku vzduchu,
- umožňovat postupné vysoušení, zahřátí na zápalnou teplotu, hoření a dokonalé vyhoření zrn paliva,
- shromažďovat, anebo zajišťovat odvod tuhých zbytků po spalování,
- regulovat tepelný výkon podle požadované výkonnosti kotle.

Podle způsobu přemísťování paliva v roštovém ohništi rozeznáváme:

- pevné rovinné rošty s nehybnou vrstvou paliva,
- rošty s občasným přemísťováním paliva,
- rošty s trvalým přemísťováním paliva.

*Pevné rovinné rošty s nehybnou vrstvou paliva* jsou nejstarší typy roštů – rošty u malých kotlů na lokální vytápění, rošty u starších plamencových a lokomotivních kotlů, stupňovitý rošt.

*Rošty s občasným přemísťováním paliva* jsou tvořeny roštnicemi, kterými je možno různými mechanismy pohybovat (elektromotorem s táhly, hydraulicky), aby docházelo k rozrušování spečené škváry, promíchávání paliva, posunu paliva a odvodu popele z ohniště – přesuvný rošt, vrtisuvný rošt (kaskádovitý, typu Martin), válcový rošt.

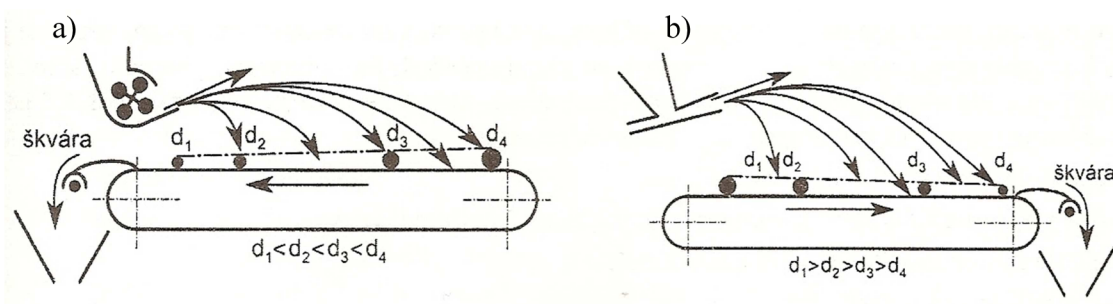
*Rošty s trvalým přemísťováním paliva* jsou nejrozšířenější v dnešní době – řetězový rošt, pásový rošt. Rošt je tvořen hornou plochou běžícího pásu, který je tepelně namáhán, zatímco spodní část je chlazená vzduchem, aby se nedocházelo k opalu roštnic při použití výhřevnějšího paliva.

### 4.1.3 Podávání a spalování paliva

Zařízení pro podávání paliva ze zásobníku na rošt jsou následující:

- násypka,
- šnekový dopravník,
- mechanický pohazovač (Obr. 5a),
- pneumatický pohazovač (Obr. 5b).

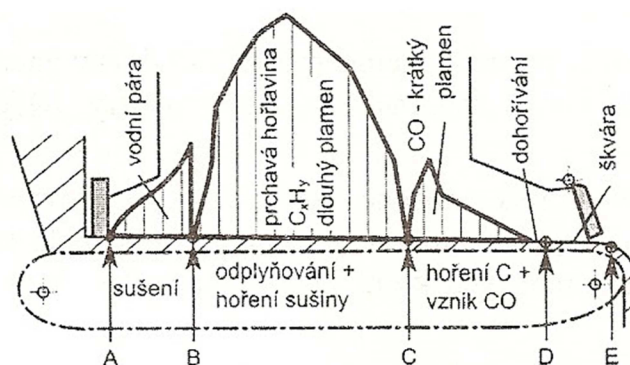
Pohazovací zařízení se používají pro paliva s vyšším obsahem prchavé hořlaviny. Dále se používají pro paliva s vyšším podílem vody, protože umožňují částečné vysoušení paliva v letu před jeho dopadem na rošt. V případě pneumatického pohazovače jemnější částice můžou i shořet za letu.



Obr. 5 Pohazovač a) mechanický, b) pneumatický [1]

Na Obr. 6 jsou znázorněny fáze spalování, kterými prochází palivo na roštu [1]:

- sušení (oblast A-B) – při 120 °C se vypuzuje z paliva část vody
- odplyňování (oblast B-C) – nad 250 °C se uvolňuje prchavá hořlavina
- hoření prchavé hořlaviny a zápal vrstvy tuhé hořlaviny (oblast C-D)
- dohořívání tuhé fáze a chladnutí tuhých zbytků (oblast D-E).



Obr. 6 Fáze spalování paliva na roštu [1]

Celkovou roštovou plochu můžeme rozdělit na účinnou (oblast B-C a C-D) a na pomocnou plochu roštu (oblast A-B a D-E). Všechny fáze spalování na roštu proběhnou pouze tehdy, když část tepla uvolněného spalováním (poměrné vzněcovací teplo) se vrátí do reakce, aby umožnil zapálení dalšího paliva. V závislosti na zrnitosti a vlhkosti paliva se reguluje rychlost pohybu roštu a výška vrstvy paliva na roštu. V případě malých zrn a nízké vlhkosti palivo se spaluje rychleji, tedy rychlost posuvu roštu je vyšší a pomocí hradítka je

nastavována tlustší vrstva paliva na roštu, v případě velkých zrn a vysoké vlhkosti palivo se spaluje pomaleji, tedy rychlost posuvu roštu je nižší a vrstva paliva na roštu je tenčí.

## **4.2 Kotle fluidní**

Fluidní kotle byly vyvinuty pro spalování paliva širokého rozsahu. Ve fluidních ohništích se spaluje drcené palivo se zrnky do 6 mm ve fluidní vrstvě vytvořené vzestupným proudem spalovacího vzduchu a vznikajících spalin. Fluidní vrstva je disperzní systém (palivo, popel, odsiřovací aditivum, aditivum pro stabilitu fluidní vrstvy), který se vytváří průtokem plynu vrstvou částic nasypaných na fluidní rošt.

## **4.3 Kotle práškové**

Práškové kotle spalují rozemletý uhelný prášek se zrnky do 1 mm. Měrný povrch prášku je 100 až 1000 násobně větší než kusové uhlí, tím dochází u těchto typů kotlů k intenzivnějšímu spalování. Práškové kotle jsou používány pro nejvyšší výkony, protože nemají rošt, který omezuje teplotu primárního vzduchu a tepelné zatížení ohniště.

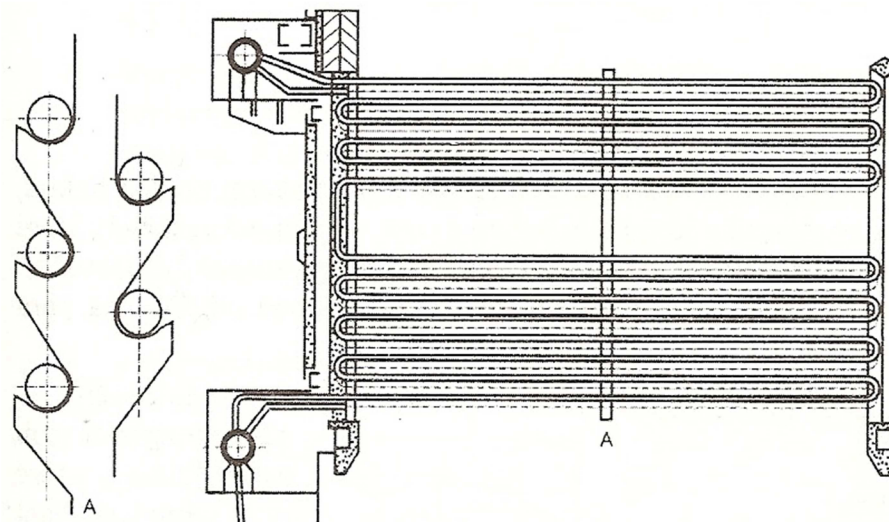
## 5 Výměníková část kotlů

Výměníková část parního kotle (parní generátor) je nejsložitější částí výroby elektrické a tepelné energie, skládá se z těchto celků:

- ohřívák vody (ekonomizér)
- výparný systém
- přehřívák páry

### 5.1 Ohřívák vody

Ohřívák vody (ekonomizér) je jednoduchý nízkoteplotní výměník kotle v oblasti nejnižších teplot spalin. Je první teplosměnnou plochou ze strany vody a většinou předposlední plochou ze strany spalin před ohřívákem vzduchu. V ekonomizéru dochází k ohřevu chemicky upravené napájecí vody z teploty 105 – 200 °C (v závislosti na tlaku) na teplotu blízkou teplotě varu.



Obr. 7 Ohřívák vody [1]

### 5.2 Výparný systém

Výparník je nejsložitějším výměníkem kotle umístěn v oblastech s nejvyšší teplotou spalin. Vyrábí sytou páru z napájecí vody přiváděné obvykle z ekonomizéru. V závislosti na provozním tlaku výparník přejímá od 30 do 65 % veškerého tepla předaného v kotli (s rostoucím tlakem podíl tepla do výparníku klesá) [2]. Sdílení tepla se u výparníku nejvíce projevuje sáláním. Základním prvkem výparníku jsou varné trubky, které tvoří membránovou stěnu kolem spalovací komory. Přijímají teplo ze spalin, v nichž se odpařuje voda a parovodní směs pak odchází do bubnu. Součástí výparníku je i buben, což je tlustostěnná tlaková nádoba funkcemi oddělit páru od vody, odstraňovat z vody soli a udržovat zásobu vody ve výparníku na konstantní hladině. Průtočné kotle bubny nemají. Další části výparníku jsou zavodňovací trubky a komory, sběrné trubky a komory a případné dodatkové plochy.

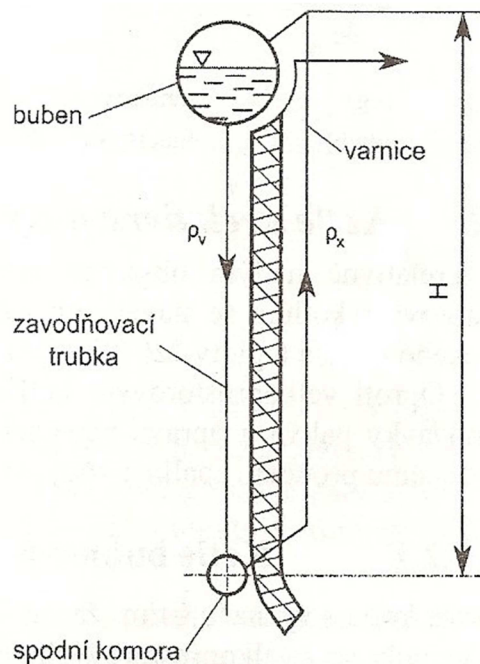
Typy výparníků bubnových kotlů jsou:

- výparník s přirozenou cirkulací
- výparník s nuceným oběhem

Přirozená cirkulace ve výparníku kotle vzniká z důvodu, že hydrostatický tlak vody v zavodňovacích (neotápěných) trubkách a směsi vody a páry ve varných (otápěných) trubkách je rozdílný [1]:

$$\Delta p = g \cdot H \cdot (\rho_v - \rho_x)$$

kde	$g$	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
	$H$	$[m]$	výška varného systému
	$\rho_v$	$[kg \cdot m^{-3}]$	střední měrná hmotnost vody v zavodňovacích trubkách
	$\rho_x$	$[kg \cdot m^{-3}]$	střední měrná hmotnost vody ve varných trubkách



Obr. 8 Výparník s přirozenou cirkulací [1]

Pokud přirozená cirkulace není dostatečná kvůli malé konstrukční výšce, nebo malého rozdílu hydrostatických tlaků, používá se oběhové čerpadlo s dopravním přetlakem 0,3 až 0,6 MPa a mluvíme o nuceném oběhu [2].

### 5.3 Přehřívák páry

Přehřívák páry je poslední teplosměnnou plochou kotle ze strany vody. Přehřívá sytou páru z výparníku na požadované parametry, aby snížil vlhkost po expanzi v turbíně a zvýšil účinnost pracovního cyklu. Podle způsobu sdílení tepla rozeznáváme přehříváky [1]:

- konvekční (přestup tepla hlavně konvekcí) – přehřívák je umístěn v oblasti druhého tahu, kde teplota spalin je nižší,
- sálavé (přestup tepla hlavně sáláním) – přehřívák je umístěn v ohništi kotle.

Mezi jednotlivými stupni přehříváků je vřazena regulace teploty přehřáté páry, aby výsledná teplota za posledním přehřívákem odpovídala předepsané hodnotě. Chlazení přehřáté páry se děje buď vstříkem napájecí vody, nebo přes výměník v bubnu.

## 6 Parní kotel na biomasu

V současné době vzrůstá význam parních kotlů spalujících biomasu, protože biomasa je obnovitelným zdrojem energie. Při konstrukci kotle na biomasu je třeba brát v úvahu specifické vlastnosti biomasy, jako vysoký podíl prchavé hořlaviny, nízká teplota měknutí popele, malý podíl popelovin, přítomnost síry, chloru a alkálii v palivu a velké kolísání vlhkosti paliva. Biomasa se dělí na dřeviny a stébelniny. Je třeba mít na zřeteli, že obě druhy biomasy vyžadují odlišnou konstrukci kotlů. Kotle na biomasu jsou nejčastěji používány při vytápění rodinných domů a menších komplexů.

V další části mé práce se zabývám konkrétním parním kotlem na biomasu, který je určen na kogenerační výrobu tepla a elektřiny z obnovitelných zdrojů, navržený pro teplárnu společnosti Dalkia, a.s. v Mariánských Lázních. Během montáže kotle jsem měl možnost strávit dva dny na místě. Během této doby jsem se seznámil se stavbou kotle, s funkcemi jednotlivých částí a získal jsem fotodokumentace o kotle. Od dodavatele kotle První brněnská strojírna, a.s. jsem získal dokumentaci (technická specifikace, popis regulačních obvodů a ovládání kotle) a výkresy kotle (technologické schéma voda – para, spaliny – vzduch), které jsem použil jako zdroje při vypracování této práce.

### 6.1 Charakteristika kotle

#### 6.1.1 Technická data

Kotel je vodotrubný, roštový, s přirozeným oběhem parovodní směsi ve výparníku. Je určen k spalování biomasy ve formě dřevní štěpky s možností přimísení rostlinných peletek.

Tab. 1 Parametry kotle [4]

Veličina	Hodnota	Jednotka
<b>Výkon</b>		
Jmenovitý parní výkon kotle (při teplotě napájecí vody 105 °C) bez stabilizace	12	[t/h]
Mín. výkon kotle bez stabilizace	4,8	[t/h]
Max. přetížení výkonu kotle	13,2	[t/h]
<b>Pára</b>		
Jmenovitý tlak páry	3,4	[MPa]
Teplota páry na výstupu z kotle pro výkony od 4,8 t/h do 13,2 t/h	397 ± 7,5	[°C]
<b>Účinnost</b>		
Účinnost kotle při jmenovitém výkonu přepočítána na vztažné palivo	92	[%]
Účinnost kotle při výkonu 4,8 t/h přepočítána na vztažné palivo	86	[%]
<b>Napájecí voda</b>		
Teplota napájecí vody	105 ± 3	[°C]
<b>Spaliny</b>		
Teplota spalin na výstupu kotle	135 ± 5	[°C]

### 6.1.2 Palivo a spaliny

Hlavním palivem kotle je dřevní štěpka, k čemuž může být přimíchávána rostlinná peletka s podmínkou, že energetický podíl peletky nepřesáhne 20 % z celkového energetického příkonu paliva. Dalšími podmínkami jsou, že obsah chlóru paliva na vstupu do kotle nesmí přesáhnout 0,03 % a teplota měknutí popela musí být větší než 1000 °C [4].

Tab. 2 Specifikace paliva [4]

	Dřevní štěpka	Rostlinné peletky
Výhřevnost [MJ/kg]	8-15	8-17
Obsah vody [%]	max. 50	max. 10
Obsah popele [%]	max. 7	max. 12
Obsah chlóru [%]	max. 0,03	max. 0,03

Chlór a popel jsou příčinami různých provozních problémů v kotli. Chlor způsobuje koroze u výhřevných ploch nad 400 °C, zatímco měkký popel se nalepuje na výhřevné plochy a zhorší prostup tepla ze spalin do vody a páry [1].

Tab. 3 Parametry spalin na výstupu z kotle [4]

Veličina	Hodnota	Jednotka
<b>Průtočné množství spalin na výstupu z kotle</b>		
Max. množství spalin pro dimenzování čištění spalin	22 500	Nm <sup>3</sup> /h
Jmenovité množství spalin (při jmenovitém výkonu kotle)	16 400	Nm <sup>3</sup> /h
Min. provozní množství spalin	6 000	Nm <sup>3</sup> /h
<b>Podtlak spalin na výstupu z kotle</b>		
Max. podtlak za kotlem	900	Pa
Jmenovitý podtlak za kotlem	600	Pa
<b>Složení spalin na výstupu z kotle</b>		
Max. koncentrace tuhých znečišťujících látek (provoz bez ofukování)	6 000	mg/Nm <sup>3</sup>
Max. koncentrace tuhých znečišťujících látek (provoz při ofukování)	10 000	mg/Nm <sup>3</sup>
Obsah O <sub>2</sub>	3,5 – 7	% obj.
Obsah N <sub>2</sub>	58 – 64	% obj.
Obsah H <sub>2</sub> O	18 – 27	% obj.
Obsah CO <sub>2</sub>	11 – 12	% obj.
Obsah SO <sub>2</sub>	≤ 0,02	% obj.

Maximální hodnota úrovně emisí škodlivých látek v suchých kouřových plynech s obsahem 6 % O<sub>2</sub> při absolutním tlaku 101,325 kPa a teplotě 0 °C [4]:

- oxid uhelnatý (CO) ≤ 390 mg/Nm<sup>3</sup>
- oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>) ≤ 250 mg/Nm<sup>3</sup>

Oxid uhelnatý a oxidy dusíku patří mezi škodliviny, jejichž množství lze výrazně omezit řízením spalovacího procesu. Zaručováním dostatečné teploty spalin pro požadovaný čas a přívodem sekundárního vzduchu do spalovací komory v několika úrovních lze docílit

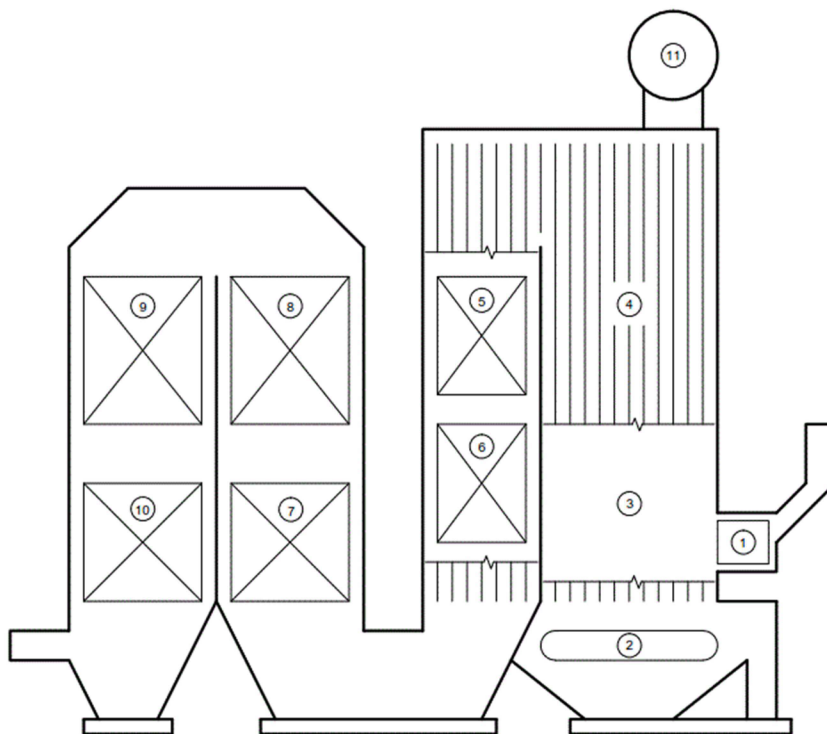


dohoření hořlavé složky biomasy a snížení emise oxidu uhelnatého. Emisi oxidů dusíku lze snížit podstechiometrickým spalováním a přívodem sekundárního vzduchu [7].

Z ekologického hlediska je důležité, že při spalování biomasy se uvolní stejné množství oxidu uhličitého, kolik spotřebovala rostlina během svého života pro růst. Konečné množství  $\text{CO}_2$  v atmosféře se teda nezvyšuje, a tak spalování biomasy nepřispívá ke skleníkovému efektu.

### 6.1.3 Stavba a provoz

Na Obr. 9 jsou schematicky znázorněny hlavní části kotle: 1 – podavač paliva, 2 – rošt, 3 – ohniště (spalovací komora), 4 – výparník (membránové trubkové stěny kotle), 5 – přehřívák páry č. 2, 6 – přehřívák páry č. 1, 7 – ohřívák vzduchu č. 2, 8 – ohřívák vody (ekonomizér) č. 2, 9 - ohřívák vody (ekonomizér) č. 1, 10 - ohřívák vzduchu č. 1., 11 – kotlový buben



Obr. 9 Schéma kotle

Podle Obr. 9 lehko můžeme popsat cestu paliva (1, 2), cestu spalin (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10), cestu vzduchu (10, 7, 2 resp. 3, 1) a cestu vody a páry (9, 8, 11, 4, 11, 6, 5).

#### Cesta paliva

Palivo ze zásobníku pomocí pneumatických podavačů se dostane na rošt.

#### Cesta spalin

Kotel je čtyřtahový. Spaliny vznikají ve spalovací komoře nad roštem, odcházejí nahoru (1. tah), procházejí vodorovným spalinovodem, obracejí se a proudí směrem dolů (2. tah).

První dva tahy jsou tvořeny membránovými trubkovými stěnami kotle. V druhém tahu jsou umístěny dva bloky přehříváků. V plechovém spalinovém kanálu, tj. v třetím a čtvrtém tahu jsou umístěny dva bloky ohříváku vzduchu a dva bloky ekonomizéru.

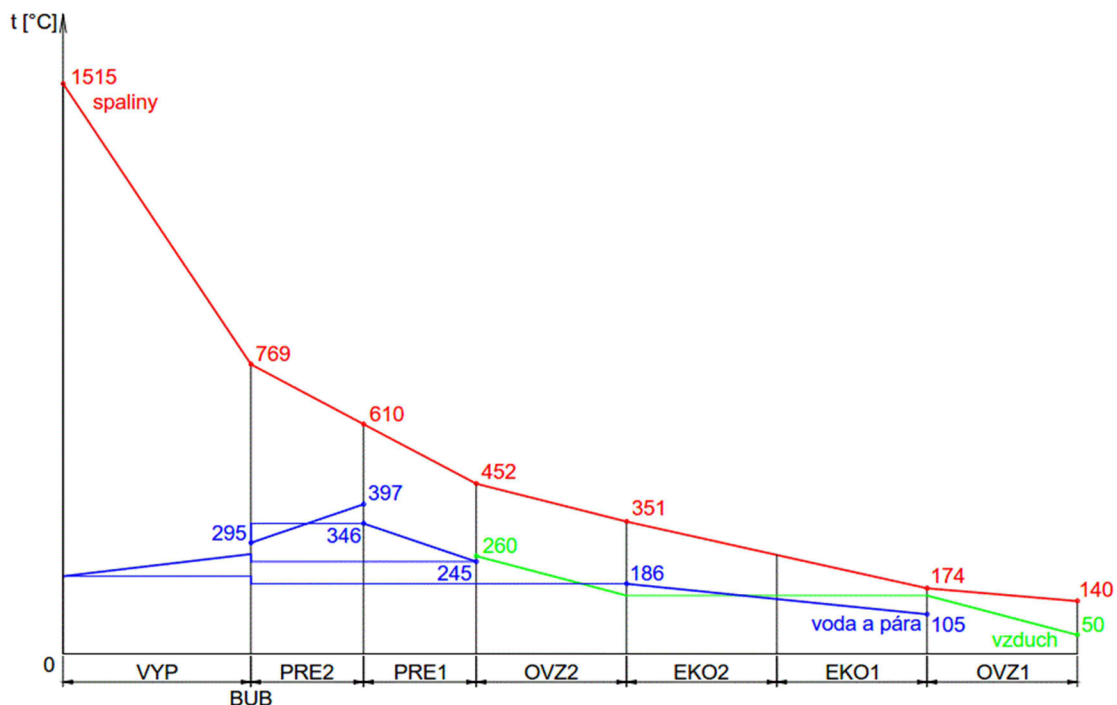
### Cesta vzduchu

Předehříváný nasávaný vzduch prochází přes ohříváky vzduchu, recirkuluje se (předehřívá nasávaný vzduch). Poté je rozdělen na primární, sekundární a pohazovací vzduch. Primární vzduch spolu s recirkulovanými spaliny je přiváděn pod rošt. Sekundární vzduch je přiváděn do spalovací komory, kde v několika úrovních jsou rozmístěny trysky sekundárního vzduchu.

### Cesta vody a páry

Chemicky upravená napájecí voda prochází přes ekonomizéry (popř. pouze přes ekonomizér č. 2) do bubnu. Z bubnu je zavedena zavodňovacími trubkami výparníku, kde se ohřívá a vypařuje. Poté se vrací zpět do bubnu, kde dochází k oddělování syté páry od vody. Sytá pára z bubnu jde do přehříváků (část páry z přehříváku č. 1 se ochladí v bubnu, poté se znovu smíchá se zbylou párou a jde do přehříváku č. 2), kde se mění na přehřátou páru o požadovaných parametrech.

V spalovací komoře kotle se dochází k vývinu tepla, co pomocí různých teplosměnných ploch se postupně předává. Na Obr. 10 je znázorněno, že snižuje se teplota spalin (z 1515 °C na 140 °C), zatímco se zvyšuje teplota vzduchu (z 50 °C na 260 °C) a ohřívá se i voda a pára (ze 105 °C na 397 °C).



Obr. 10 Průběh teplot spalin, vzduchu, vody a páry

BUB – kotlový buben, EKO1 – ekonomizér č. 1, EKO2 – ekonomizér č. 2, OVZ1 – ohřívák vzduchu č. 1, ohřívák vzduchu č. 2, PRE1 – přehřívák páry č. 1, PRE2 – přehřívák páry č. 2, VYP - výparník

## 6.2 Zařízení kotle

### 6.2.1 Spalovací zařízení

#### Provozní zásobník paliva

Provozní zásobník paliva s negativním úhlem sklonu stěn je umístěn na plošině před přední stěnou kotle. Objem zásobníku je cca 15 m<sup>3</sup>, což je přibližně hodinová spotřeba paliva. Zásobník je vybaven měřením zaplnění, což slouží k regulaci výkonu dopravy paliva do zásobníku. V zásobníku jsou umístěny čtyři šnekové podavače pro přívod paliva ze zásobníku do kotle. Množství přiváděného paliva závisí na požadovaném výkonu kotle, proto každý šnekový podavač má vlastní pohon s frekvenčním měničem, rychlost otáček podavačů je tedy nastavitelná.

#### Pohazovače paliva

Přívod paliva na rošt zajišťují dvě svodky, které z bezpečnostních důvodů jsou vybaveny měřením teploty a tryskami pro přívod hasící vody. V horní části svodek je pneumatický rychlouzávěr pro bezpečné uzavření palivových svodek a přerušení dodávku paliva v případě nedostatečného tlaku ovládacího vzduchu. V dolní části svodek jsou pneumatické pohazovače, které dopravují palivo na rošt přes otvory v přední stěně spalovací komory. Podavač paliva funguje pomocí pohazovacího vzduchu. Pohazovací zařízení tvoří rotační klapky na přívodu pohazovacího vzduchu a výkyvné klapky se závažím sloužící k ochraně zásobníku proti zpětnému vniknutí spalin.

#### Zapalovací hořák

Pro zapalování paliva slouží ruční přenosný zapalovací hořák s dvoukilovou propanbutanovou láhví, který je vybaven držákem pro lepší manipulaci.

#### Rošt

Rošt je protiběžný (pohybuje od zadní stěny spalovací komory k přední), vzduchem chlazený. Rozměry roštu jsou 1867 mm x 3048 mm, tepelné zatížení je cca 1,8 MW/m<sup>2</sup> [4]. Rošt je postavený na vlastní nosné konstrukci. Sestává z roštnic, litinového vedení, čepů a řetězů. Rošt je poháněn elektromotorem přes měnič frekvencí, aby rychlost posuvu roštu byla nastavitelná podle stupně vyhoření biomasy na konci roštu.

#### Vzduchový systém

Vzduchový systém zahrnuje primární, sekundární a pohazovací ventilátor, na které jsou umístěny tlumiče hluku. Dále sestává z ohříváku vzduchu a vzduchovodů včetně kompenzátorů, klapek a tlumičů. Celkové množství nasávaného vzduchu při jmenovitém výkonu kotle je rozdělen na cca 90 % spalovací a cca 10 % pohazovací vzduch. Spalovací vzduch je nasáván z prostoru kotelny nebo z venkovního prostoru, pohazovací vzduch je nasáván z kotelny. Spalovací vzduch za ekonomizéry je rozdělen na cca 45 % primární, cca 45 % sekundární a cca 10 % pohazovací vzduch. Množství pohazovacího vzduchu je konstantní při všech provozních stavech kotle (0,75 m<sup>3</sup>/s při teplotě 20 °C). Obsah O<sub>2</sub> ve spalinách musí být v rozmezí 3 – 5 %, proto výkon primárního a sekundárního ventilátoru je řízen frekvenčním měničem podle otáček šneků v zásobníku paliva [4].

## Čistící systém

Svazky výhřevných ploch ze strany spalin jsou čištěny pomocí parních ofukovačů, pára je odebírána z potrubí za kotlem. Před přehřívákem č. 2 a přehřívákem č. 1 jsou umístěny dlouhovýsvné ofukovače pro čištění přehříváků, kde teplota spalin je vyšší než cca 500 °C. Bloky ohříváku vzduchu a bloky ekonomizéru, kde teplota spalin je pod 500 °C, jsou čištěny trvale zabudovanými krátkovýsvnými ofukovači.



*Obr. 11 Krátkovýsvný parní ofukovač*

### Odvod popele a škváry

Po spalování paliva padá popel a škvára z roštu a z výsypky roštu do vynašeče, kterým je vynášen do kontejneru. Odvod popela z druhého, třetího a čtvrtého tahu je vyřešen popelovými výsypkami, které jsou z ocelového plechu. Popel z výsypek je vracen zpět do spalovací komory, aby množství nespáleného uhlíku bylo sníženo.

### Odvod spalin

Pro odvod spalin slouží spalinovod mezi druhým a třetím tahem, plechový spalinový kanál třetího a čtvrtého tahu a spalinovod mezi třetím a čtvrtým tahem. Spalinovody jsou plechové, vyztužené válcovanými profily. Mezi druhým a třetím tahem je zabudovaný kompenzátor kvůli jejich rozdílné roztažnosti. Část spalin je recirkulována pomocí recirkulačního ventilátoru, tj. přidávána do primárního vzduchu a vracena zpět do spalovací komory kvůli ovlivňování teploty spalin ve spalovací komoře. Recirkulační ventilátor spalin je opatřen frekvenčním měničem, aby množství recirkulovaných spalin bylo regulovatelné nastavením výkonu ventilátoru.

## 6.2.2 Tlakový systém

### Ohřívák vody

Ohřívák vody (ekonomizér) se skládá ze dvou svazků, které jsou umístěny na konci třetího tahu a na začátku čtvrtého tahu kotle. Svazky jsou vyrobené z trubek o průměru 31,8

mm, z materiálu P235GH, s příčnou i podélnou roztečí 80mm [4]. Jsou zavěšeny na nosnicích vetknutých do bočních stěn plechového spalínového kanálu kotle pomocí táhel. Napájecí voda vstupuje do vstupní komory ekonomizéru a proudí v protiproudu do výstupní komory ekonomizéru. Obtok svazků ohříváku vody slouží pro regulaci teploty spalin na výstupu z kotle a je řízen trojcestným regulačním ventilem (viz kapitola 7.2.3).



*Obr. 12 Trubky ohříváku vody*

### **Kotlový buben**

Kotlový buben o průměru 1200 mm je umístěn nad stropem spalovací komory [4]. Součástí bubnu je vestavba, která zabezpečuje požadovanou kvalitu páry před vstupem do přehříváku č. 2. V bubnu se nachází výměník, ve kterém se chladí část páry z přehříváku č. 1 na požadovanou teplotu (viz kapitola 7.1.3). Součástí bubnu jsou také potrubí syté páry, nátrubky pro zavodňovací a převáděcí potrubí, nátrubky pro přívod vody a kromě toho ještě další potřebná potrubí a nástavce pro armatury.



*Obr. 13 Kotlový buben*



## Výparník

Výparník tvoří membránové stěny prvního a druhého tahu kotle, jsou vyrobené z trubek o průměru 60,3 mm [4]. Součástí výparníku jsou vstupní (spodní) a výstupní (horní) zavodňovací komory. Součástí výparníku jsou také zavodňovací a převáděcí potrubí.



*Obr. 14 Výparník*

## Přehřívák páry

Přehřívák páry je dvoustupňový. První stupeň je umístěn na konci druhého tahu v protiproudu, druhý stupeň je umístěn na začátku druhého tahu v souproudu. Obě stupně tvoří jeden samostatný svazek vyrobený z trubek o průměru 31,8 mm, z materiálu P235GH. Příčná rozteč svazku prvního stupně je 100 mm, druhého stupně je 200 mm [4]. Přehříváky jsou zavěšeny pomocí háčků a přichyceny k přední a zadní stěně druhého tahu kotle.

## Parovod

Parovod začíná na výstupní komoře přehříváku č. 2. Součástí výstupního parovodu jsou návarky pojistného a najížděcího ventilu, hlavní parní uzávěr a odběrová místa pro měření parametrů odchozí páry. Clona pro měření průtoku páry se nachází v parovodu za výstupem z kotle.

## Převáděcí potrubí

Mezi převáděcí potrubí patří potrubí od napájecí hlavy k vstupní komoře ekonomizéru, mezi výstupní komorou ekonomizéru a bubnem, mezi bubnem a přehřívákem páry, propojovací potrubí přehříváku a zavodňovací a převáděcí potrubí výparníku, tedy všechna potrubí kotle. Zahrnuje také najížděcí potrubí.



*Obr. 15 Hlavní zavodňovací potrubí*

### **6.2.3 Ostatní části**

#### **Jemná armatura**

Do jemné armatury náleží zákonem předepsané pojistné ventily s tlumičem hluku, odvodňovací, odvzdušňovací, odkalovací, uzavírací a zpětné armatury kotle. Také zahrnuje místní měřicí přístroje tlaku, teploty a výšky hladiny. Dále patří sem odvzdušňovací, odvodňovací, odkalovací potrubí a potrubí odluhu včetně sběrných komor a potřebných závěsů, podpěr, vedení, těsnícího a spojovacího materiálu.

#### **Hrubá armatura**

Hrubá armatura zahrnuje všechny průřezy k místům vyžadujících kontrolu, obsluhu a údržbu (rošt, jednotlivé výhřevné plochy) a kukátka ve stěnách spalovací komory.

#### **Izolace**

Celý kotel je izolován. Vnější povrch izolace tvoří hliníkový plech o tloušťku 0,8 mm. Izolace je navržena tak, aby při teplotě okolí 25 °C teplota povrchu nepřesáhla 50 °C [4].

#### **Nosná konstrukce**

Kotel je samonosný, je postaven na nosné konstrukci, která slouží k podepření spodních komor membránových stěn (1. a 2. tah) a plechového spalínového kanálu (3. a 4. tah) kotle. Rošt je uložen na vlastní nosnou konstrukci.



*Obr. 16 Nosná konstrukce membránových stěn a roštu*

### **Ochozy a schody**

Ochozy a schody umožňují přístup k jednotlivým částem kotle vyžadujících kontrolu, obsluhu a údržbu. Jsou uchyceny na lehké ocelové konstrukce a jsou pokryty pororošty. Součástí ochozů a schodů jsou také zábradlí a okopové plechy.



## 7 Regulační obvody parního kotle na biomasu

Automatická regulace napomáhá ke zvýšení účinnosti a životnosti kotlů. Regulacím kotle se rozumí působení na jeho vstupní parametry s cílem udržování výstupních parametrů na požadované výši. Regulace se dosahuje regulačním obvodem následovně [2]:

- regulovaná veličina je změřena měřícím členem,
- porovnávací člen porovnává velikost regulované a řídicí veličiny,
- rozdíl těchto veličin je tzv. regulační odchylka, co se přivádí do regulátoru,
- regulátor po zpracování regulační odchylky vysílá signál do akčního členu,
- pomocí akčního členu se nastavuje akční veličina do regulované soustavy.

Parní kotel na biomasu je vybaven regulačními a bezpečnostními obvody a předpřipravenými sekvencemi ovládání, které usnadní obsluhu kotle a zamezí nevhodným zásahům při provozu. Dále zajišťuje ochranu kotelního zařízení a obsluhujícího personálu v případě výskytu závažné provozní poruchy a hospodárný provoz kotle.

Správná funkce automatických regulačních obvodů je zaručena v rozmezí cca od 40 do 110 % jmenovitého výkonu kotle (tj. cca od 4,8 do 13,2 t/h), skutečné hranice je nutno zjistit za provozu [3]. Za těmito hranicemi může dojít k nespolehlivému provozu, v tomto případě příslušné regulační prvky třeba řídit ručně, respektováním zásad uvedených v provozních předpisech.

Aktivace a vyřazení regulačních obvodů, zapínání a odpojování pohonů nebo skupin pohonů a přestavování armatur se hlavně provádí z velína. Také lze zvolit ovládání místní. Přepnutím do režimu místního ovládání se vyřazují ochrany a blokády u vybraného pohonu, což může mít za následek vznik nežádoucích a nebezpečných stavů. Manuální řízení pohonu je proto zásah, který se může provádět jen ve výjimečných případech personálem dokonale seznámeným se všemi důsledky a na jeho plnou zodpovědnost.

V parním kotli se nacházejí následující regulační obvody [3]:

- v systému voda – pára
  - regulace hladiny vody v parním bubnu
  - regulace tlaku vody na napájecím ventilu
  - regulace teploty páry na výstupu z kotle
  - regulace parního výkonu kotle
  - regulace množství odluhu z kotle
  - regulace pH kotelní vody
- v systému spalování
  - regulace spalovacího výkonu kotle
  - regulace množství spalovacího vzduchu
  - regulace teploty spalin na výstupu z kotle
  - regulace podtlaku spalin ve spalovací komoře

## 7.1 Regulační obvody kotle v systému voda – pára

### 7.1.1 Regulace hladiny vody v parním bubnu

Účelem regulačního obvodu je udržovat výšku hladiny vody v parním bubnu ve stanoveném rozmezí. Regulace se děje řízením množství napájecí vody vstupující do kotle.

<i>Akční člen:</i>	regulační ventil na napájecí hlavě
<i>Regulovaná veličina:</i>	výška hladiny vody v bubnu
<i>Měřená veličina:</i>	výška hladiny vody v bubnu průtok vody před kotlem průtok páry za kotlem

Normální úroveň hladiny vody v bubnu je ve výšce osy bubnu, povolená regulační odchylka je  $\pm 50$  mm. Napájení kotle se řídí buď jednoimpulsovou, nebo tříimpulsovou regulací. Jednoimpulsová regulace vyhodnocuje jen údaj o výšce hladiny vody v bubnu: je-li hladina vody v bubnu vyšší než normální, regulační ventil na napájecí hlavě se zavírá, je-li hladina vody nižší než normální, regulační ventil se otevírá. V případě tříimpulsové regulace do regulačního obvodu jsou zahrnuty jak údaje o výšce hladiny v bubnu, tak i údaje o průtoku páry a vody: je-li rozdíl průtoku páry za kotlem a průtoku vody před kotlem kladný, regulační ventil na napájecí hlavě se otevírá, je-li tento rozdíl záporný, regulační ventil se zavírá.

Tab. 4 Charakteristické úrovně hladiny v bubnu [3]

Hodnota	Charakteristika	Funkce
+200 mm	Blokovací úroveň	Z bezpečnostních důvodů je přerušena dodávka paliva do kotle
+120 mm	Nouzové vypouštění bubnu	Stav je signalizován pro obsluhu a nouzové vypouštění z bubnu je na hodnotě 100%
+80 mm	Horní výstraha	Stav je signalizován pro obsluhu a nouzové vypouštění z bubnu je na hodnotě 50%
+50 mm	Horní mez regulačního rozsahu	
0 mm	Normální hladina	
-50 mm	Dolní mez regulačního rozsahu	
-80 mm	Dolní výstraha	Stav je signalizován pro obsluhu
-200 mm	Blokovací úroveň	Z bezpečnostních důvodů dodávka paliva do kotle je přerušena

### 7.1.2 Regulace tlaku vody na napájecím ventilu

Účelem regulačního obvodu je udržovat tlakovou diferenci před a za regulačním ventilem napájecí vody do kotle. Regulace se děje řízením otáček napájecího čerpadla.

<i>Akční člen:</i>	motor napájecího čerpadla
<i>Regulovaná veličina:</i>	tlaková diference na napájecím ventilu
<i>Měřená veličina:</i>	tlak vody před napájecím ventilem tlak vody za napájecím ventilem

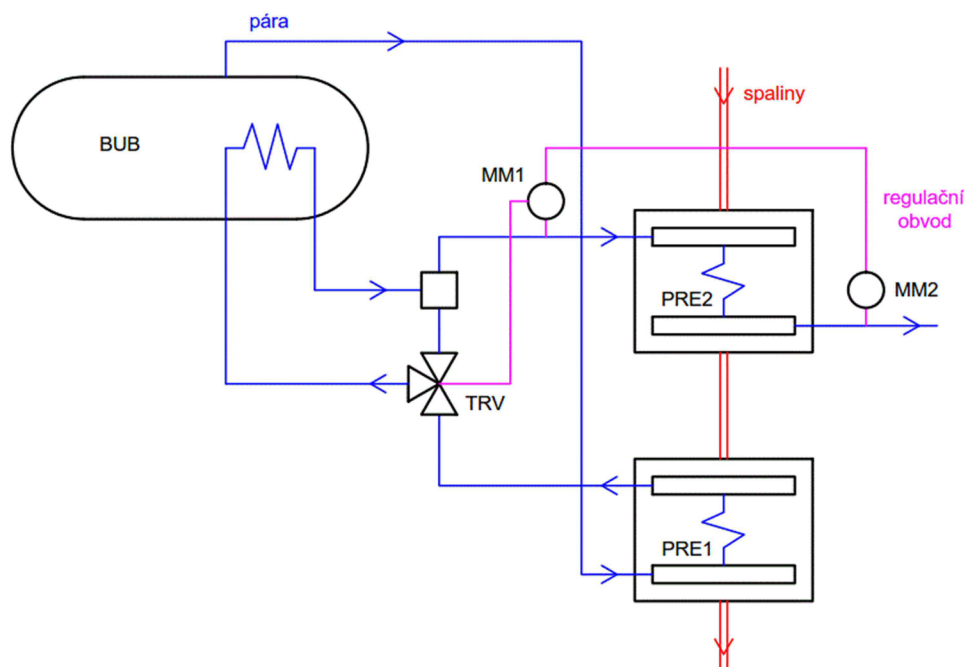
Tlaková diference se udržuje na předepsané hodnotě 4 – 5 : jestliže tlaková diference roste, otáčky napájecího čerpadla se sníží, jestliže se tlaková diference zmenšuje, otáčky napájecího čerpadla se zvýší.

### 7.1.3 Regulace teploty páry na výstupu z kotle

Účelem regulačního obvodu je udržovat teplotu přehřáté páry na výstupu z kotle ve stanoveném rozmezí. Regulace se děje řízením poměru množství páry vystupující z přehříváku č. 1 a procházejícího přes chladič v bubnu a množství proudící přímo do přehříváku č. 2.

<i>Akční člen:</i>	trojcestný regulační ventil
<i>Regulovaná veličina:</i>	teplota páry před přehřívákem č. 2 teplota páry za kotlem
<i>Měřená veličina:</i>	teplota páry před přehřívákem č. 2 teplota páry za kotlem

Normální hodnota teploty přehřáté páry za kotlem je 400 °C, povolená regulační odchylka je  $\pm 8$  °C. Žádaná hodnota teploty páry před přehřívákem č. 2 závisí na teplotě páry za kotlem: je-li teplota páry za kotlem nižší než žádaná hodnota, zvyšuje se velikost žádané hodnoty před přehřívákem č. 2, je-li teplota páry za kotlem vyšší než žádaná hodnota, snižuje se velikost žádané hodnoty před přehřívákem č. 2. Požadovaná teplota páry před přehřívákem č. 2 do značné míry závisí na aktuálním výkonu kotle, výhřevnosti paliva a stupni zanešení výhřevných ploch. Při poklesu teploty páry před přehřívákem č. 2 pod žádanou hodnotu trojcestný regulační ventil snižuje průtok páry do chladiče v bubnu, při zvýšení teploty páry pod žádanou hodnotu zvyšuje průtok.



Obr. 17 Schéma regulace teploty páry na výstupu z kotle

BUB – kotlový buben, MM1 – měřicí místo teploty páry před přehřívákem č. 2, MM2 – měřicí místo teploty páry za kotlem, PRE1 – přehřívák č. 1, PRE2 – přehřívák č. 2, TRV – trojcestný regulační ventil

Tab. 5 Charakteristické hodnoty teploty páry za kotlem [3]

Hodnota	Charakteristika	Funkce
425 °C	Blokovací úroveň	Z bezpečnostních důvodů je přerušena dodávka paliva do kotle
415 °C	Horní výstraha	Stav je signalizován pro obsluhu
408 °C	Horní mez regulačního rozsahu	
400 °C	Normální teplota	
392 °C	Dolní mez regulačního rozsahu	

#### 7.1.4 Regulace parního výkonu kotle

Účelem regulačního obvodu je udržovat parní výkon na konstantní hodnotě odpovídající odběru páry z kotle. Regulace se děje řízením spalovacího výkonu kotle (viz kapitola 7.2.1).

<i>Akční člen:</i>	regulační obvod spalovacího výkonu kotle
<i>Regulovaná veličina:</i>	tlak přehřáté páry za kotlem
<i>Měřená veličina:</i>	tlak přehřáté páry za kotlem

Normální hodnota tlaku přehřáté páry za kotlem je 33 bar. Při poklesu tlaku přehřáté páry za kotlem pod žádanou hodnotu je vysílán signál na zvýšení spalovacího výkonu kotle, při zvýšení tlaku přehřáté páry nad žádanou hodnotu je vysílán signál na snížení spalovacího výkonu kotle.

Tab. 6 Charakteristické hodnoty teploty páry za kotlem [3]

Hodnota	Charakteristika	Funkce
38,5 bar	Blokovací úroveň	Z bezpečnostních důvodů je přerušena dodávka paliva do kotle
37,5 bar	Nastavení pojistných ventilů	Otevírá se pojistný ventil na parovodu
37 bar	Otevření najížděcí armatury	Otevírá se uzavírací ventil na najížděcím potrubí na maximum a regulační ventil na hodnotu 10%
36 bar	Horní výstraha	Stav je signalizován pro obsluhu
33 bar	Normální tlak	

#### 7.1.5 Regulace množství odluhu z kotle

Úkolem regulačního obvodu je udržovat vodivost odluhu z kotle ve stanoveném rozmezí. Regulace se děje otevíráním a uzavíráním armatury na odluhovém potrubí.

<i>Akční člen:</i>	uzavírací ventil na odluhovém potrubí
<i>Regulovaná veličina:</i>	vodivost odluhu
<i>Měřená veličina:</i>	vodivost odluhu

Při dosažení horní vodivosti se uzavírací ventil na odluhovém potrubí otevře, při dosažení dolní vodivosti se uzavírací ventil uzavře.

### 7.1.6 Regulace pH kotelní vody

Účelem regulačního obvodu je udržovat vodivost vody v bubnu ve stanoveném rozmezí. Regulace se děje zapínáním a vypínáním dávkovacího čerpadla.

<i>Akční člen:</i>	dávkovací čerpadlo
<i>Regulovaná veličina:</i>	vodivost kotelní vody
<i>Měřená veličina:</i>	vodivost kotelní vody hladina roztoku v zásobní nádrži

Při poklesu vodivosti kotelní vody se čerpadlo zapíná, při zvýšení vodivosti kotelní vody se čerpadlo vypíná. Dávkovací čerpadlo vstříkují roztok chemické látky  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  do kotelní vody. Jestliže hladina roztoku v zásobní nádrži poklesne pod dovolenou úroveň, dávkovací čerpadlo a míchadlo se vypne.

## 7.2 Regulační obvody kotle v systému spalování

### 7.2.1 Regulace spalovacího výkonu kotle

Účelem regulačního obvodu je přizpůsobovat množství přiváděného paliva na rošt skutečnému odběru páry z kotle. Množství přiváděného paliva je regulováno otáčkami podávacích šneků nad palivovými šachtami před kotlem.

<i>Akční člen:</i>	pohon 1. podávacího šneku levé šachty pohon 2. podávacího šneku levé šachty pohon 1. podávacího šneku pravé šachty pohon 2. podávacího šneku pravé šachty
<i>Regulovaná veličina:</i>	parní výkon kotle (viz kapitola 7.1.4)

Je-li z obvodu regulace parního výkonu kotle požadováno zvýšení spalovacího výkonu kotle, zvýší se otáčky šnekových podavačů paliva, je-li požadováno snížení spalovacího výkonu, sníží se otáčky podavačů. Při zvýšení otáček šnekových podavačů paliva se zvýší množství spalovacího vzduchu, při snížení otáček podavačů se sníží množství spalovacího vzduchu (viz kapitola 7.2.2).

### 7.2.2 Regulace množství spalovacího vzduchu

Účelem regulačního obvodu je přizpůsobovat množství spalovacího vzduchu k množství paliva přiváděného na rošt. Regulace se provádí změnou otáček primárního a sekundárního ventilátoru.

<i>Akční člen:</i>	motor primárního ventilátoru motor sekundárního ventilátoru
<i>Regulovaná veličina:</i>	celkové množství spalovacího vzduchu
<i>Měřená veličina:</i>	průtok primárního vzduchu průtok sekundárního vzduchu obsah kyslíku ve spalinách

Požadované množství spalovacího vzduchu je optimalizováno tak, aby byly dosaženy co největší účinnost a co nejmenší emise kotle. Celkové množství spalovacího vzduchu je

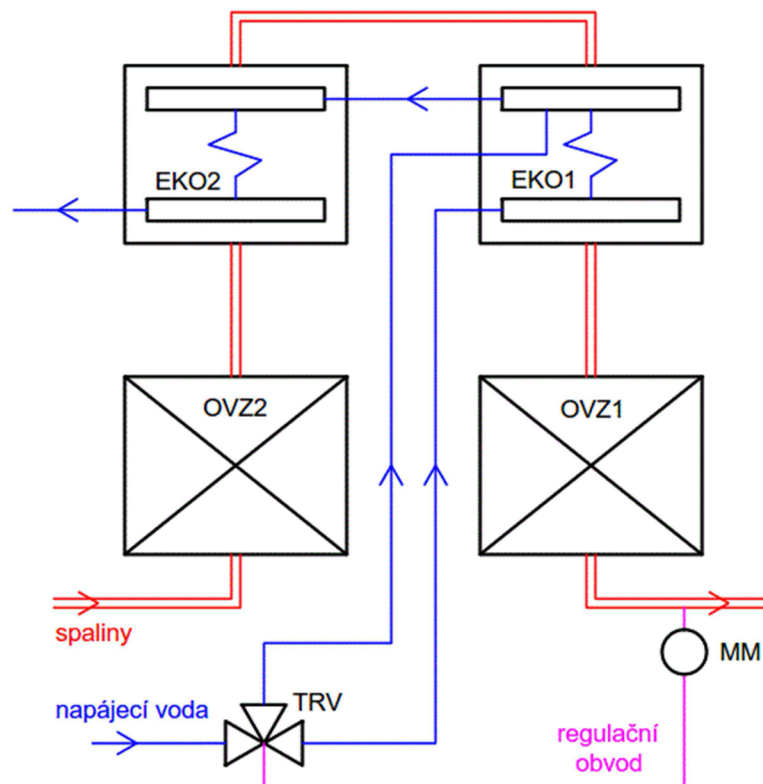
součtem množství primárního, sekundárního a pohazovacího vzduchu. Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.2.1, množství pohazovacího vzduchu je konstantní při všech výkonech kotle. Je-li z obvodu regulace spalovacího výkonu kotle požadováno zvýšení množství spalovacího vzduchu, zvýší se otáčky motorů primárního a sekundárního ventilátoru, je-li požadováno snížení množství spalovacího vzduchu, sníží se otáčky motorů. Celkové požadované množství spalovacího vzduchu je průběžně korigováno podle obsahu kyslíku ve spalinách: jestliže je změřený obsah kyslíku vyšší než požadovaná hodnota, sníží se celkový požadovaný průtok spalovacího vzduchu, jestliže je změřený obsah kyslíku nižší než požadovaná hodnota, zvýší se celkový požadovaný průtok spalovacího vzduchu.

### 7.2.3 Regulace teploty spalin na výstupu z kotle

Účelem regulačního obvodu je udržovat teplotu spalin na výstupu z kotle ve stanoveném rozmezí. Regulace se děje obtokem části studené napájecí vody kolem bloků ekonomizéru.

<i>Akční člen:</i>	trojcestný regulační ventil
<i>Regulovaná veličina:</i>	teplota spalin za kotlem
<i>Měřená veličina:</i>	teplota spalin za kotlem

Při poklesu teploty spalin za kotlem pod žádanou hodnotu trojcestný regulační ventil zvyšuje průtok studené napájecí vody kolem bloků ekonomizéru č. 1, při zvýšení teploty spalin nad žádanou hodnotu snižuje průtok napájecí vody.



Obr. 18 Schéma regulace teploty spalin na výstupu z kotle

EKO1 – ekonomizér č. 1, EKO2 – ekonomizér č. 2, MM – měřící místo teploty spalin za kotlem, OVZ1 – ohřívák vzduchu č. 1, OVZ2 – ohřívák vzduchu č. 2, TRV – trojcestný regulační ventil

## 7.2.4 Regulace podtlaku spalin ve spalovací komoře

Účelem regulačního obvodu je udržovat podtlak spalin na konci spalovací komory ve stanoveném rozmezí. Regulace se děje řízením spalinového sacího ventilátoru umístěného před komínem.

<i>Akční člen:</i>	motor sacího ventilátoru
<i>Regulovaná veličina:</i>	podtlak spalin ve spalovací komoře
<i>Měřená veličina:</i>	podtlak spalin ve spalovací komoře

Normální hodnota podtlaku spalin ve spalovací komoře je -50 Pa, povolená regulační odchylka je  $\pm 10$  Pa. Při zvýšení podtlaku spalin ve spalovací komoře nad žádanou hodnotu se zvyšují otáčky sacího ventilátoru, při snížení podtlaku spalin nad žádanou hodnotu se snižují otáčky sacího ventilátoru.

Tab. 7 Charakteristické úrovně tlaku spalin ve spalovací komoře [3]

Hodnota	Charakteristika	Funkce
0 Pa	Odstavení topení	Dodávka paliva do kotle je přerušena a vzduchové ventilátory jsou odpojeny
-20Pa	Horní výstraha	Stav je signalizován pro obsluhu
-40 Pa	Horní mez regulačního rozsahu	
-50 Pa	Normální úroveň	
-60 Pa	Dolní mez regulačního rozsahu	
-200 Pa	Dolní výstraha	Stav je signalizován pro obsluhu
-300 Pa	Odstavení spalinového ventilátoru	Dodávka paliva do kotle je přerušena a vzduchové ventilátory jsou odpojeny

## 8 Závěr

Elektřina a vytápění jsou důležitou součástí každodenního života, společnost na nich je silně závislá. Ve výrobě elektrické a tepelné energie stále hrají významnou roli parní kotle. Pro jejich provoz ve velkém měřítku se používají fosilní paliva, což se v dlouhodobém výhledu nevyplácí. Spalování ropy, zemního plynu a uhlí výrazně přispívá k tvorbě skleníkového efektu, resp. nejsou obnovitelnými zdroji energie na rozdíl od biopaliv. Z tohoto důvodu parní kotle na biomasu v posledních letech se dostaly do popředí zájmů výrobců a provozovatelů energetických zařízení. Jejich konstrukce a provoz je do značné míry závislý na specifických vlastnostech biomasy (vysoký podíl prchavé hořlaviny, nízká teplota měknutí popele, malý podíl popelovin, přítomnost různých chemických látek v palivu, velké kolísání vlhkosti paliva). Cílem inženýrů je zvýšit jejich účinnost a snížit jejich emise, proto vývoj parních kotlů na biomasu dnes patří mezi důležitým problematika v energetice.

Tato bakalářská práce se věnuje popisu struktury a obecné charakterizaci parního kotle spalující biomasu a zaměřuje se hlavně na provozní a regulační specifika. Práce je rozdělena na dvě hlavní části, první část pojednává o kotlech obecně, druhá část se zabývá konkrétním parním kotlem na biomasu.

První část práce obsahuje definice parních, teplovodních a horkovodních kotlů. Je v něm popsáno základní rozdělení parních kotlů z různých hledisek a jsou vyjmenovány jejich charakteristické parametry. Další kapitola se věnuje rozdělení paliv se zaměřením hlavně na tuhá paliva, kam patří i biomasa. Stručně jsou popsány druhy tuhých paliv, jejich hrubý rozbor a je definována výhřevnost, což je nejdůležitějším energeticko-ekonomickým vlastností paliv. Práce se dále zabývá různými typy kotlů na tuhá paliva se zaměřením na kotle roštové, které v současné době používají zejména pro spalování biomasy a odpadů. Jsou znázorněny a popsány struktura a tvar roštového ohniště a podávání a spalování paliva na roštu a jsou vyjmenovány jednotlivé funkce a druhy roštů. Jedna kapitola se zvláště věnuje parnímu generátoru kotle, protože je nejsložitější část výroby elektrické a tepelné energie.

Druhá část práce se zabývá základní charakteristikou parního kotle, jenž je zdrojem na kogenerační výrobu tepla a elektřiny z biomasy v Mariánských Lázních. Podle firemních podkladů v přehledných tabulkách jsou shrnuty nejdůležitější parametry kotle, specifikace paliva a parametry spalin na výstupu z kotle. Schéma kotle s jednotlivými jeho částmi je znázorněno na obrázku, pomocí kterého je popsána cesta paliva, spalin, vzduchu a pracovního média v kotli. Průběhy teplot spalin, vzduchu a pracovního média jsou zobrazeny v grafu. Práce dále podrobně představuje spalovací zařízení, tlakový systém a ostatní části kotle. Poslední kapitola pojednává o regulaci kotle, jsou v ní popsány hlavní regulační obvody systému voda-pára a spalování.

Na závěr lze konstatovat, že během mého pobytu v Mariánských Lázních při montáži kotle a během vypracování této práce jsem získal užitečné poznatky o struktuře a provozu parních kotlů na biomasu. Vhodná konstrukce a regulace parního biomasového kotle má vliv nejen na zvýšení výkonu, hospodárnosti, spolehlivosti a životnosti kotle, ale také na snížení znečištění životního prostředí, k čemu v dnešní době musí být věnována zvláštní pozornost.



## 9 Seznam použitých zdrojů

- [1] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [2] ČERNÝ, V., B. JANEBA a J. TEYSSLER. *Parní kotle: Technický průvodce 32*. Praha: SNTL, 1983.
- [3] PRVNÍ BRNĚNSKÁ STROJÍRNA, a.s. *Popis regulačních obvodů a ovládání kotle: Parní kotel s příslušenstvím, Mariánské Lázně*. Brno, 2013.
- [4] PRVNÍ BRNĚNSKÁ STROJÍRNA, a.s. *Technická specifikace: Parní kotel s příslušenstvím, Mariánské Lázně*. Brno, 2013.
- [5] BALÁŠ, M., M. LISÝ a J. MOSKALÍK. Kotle - 1. část. *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>
- [6] BALÁŠ, M., M. LISÝ a J. MOSKALÍK. Kotle - 2. část. *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [7] Minimalizace vlivu využívání biomasy na životní prostředí. *Podpora lokálního vytápění biomasou* [online]. [cit. 2014-05-23]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/ekomin.htm>

## 10 Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
BUB	kotlový buben
EKO1	ekonomizér č. 1
EKO2	ekonomizér č. 2
MM	měřicí místo teploty spalin za kotlem
MM1	měřicí místo teploty páry před přehřívákem č. 2
MM2	měřicí místo teploty páry za kotlem
OVZ1	ohřívák vzduchu č. 1
OVZ2	ohřívák vzduchu č. 2
PRE1	přehřívák č. 1
PRE2	přehřívák č. 2
TRV	trojcestný regulační ventil
VYP	výparník

## 11 Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
$A^r$	[%]	poměrný obsah popelovin v tuhých palivech
$g$	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
$h$	[%]	poměrný obsah hořlavín v tuhých palivech
$H$	[m]	výška varného systému
$W^r$	[%]	poměrný obsah vody v tuhých palivech
$\Delta p$	[Pa]	tlakový rozdíl
$\rho_v$	$[kg \cdot m^{-3}]$	střední měrná hmotnost vody v zavodňovacích trubkách
$\rho_x$	$[kg \cdot m^{-3}]$	střední měrná hmotnost vody ve varných trubkách

## 12 Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Hrubý rozbor uhlí.....</i>	19
<i>Obr. 2 Závislost výhřevnosti paliva na obsahu vody.....</i>	19
<i>Obr. 3 Základní části roštového ohniště.....</i>	21
<i>Obr. 4 Tvar ohniště roštového kotle a) s jedním ohniskem a b) s dvěma ohnisky hoření.....</i>	22
<i>Obr. 5 Pohazovač a) mechanický, b) pneumatický.....</i>	23
<i>Obr. 6 Fáze spalování paliva na roštu.....</i>	23
<i>Obr. 7 Ohřívák vody.....</i>	25
<i>Obr. 8 Výparník s přirozenou cirkulací.....</i>	26
<i>Obr. 9 Schéma kotle.....</i>	29
<i>Obr. 10 Průběh teplot spalin, vzduchu, vody a páry.....</i>	30
<i>Obr. 11 Krátkovýšuvný parní ofukovač.....</i>	32
<i>Obr. 12 Trubky ohříváku vody.....</i>	33
<i>Obr. 13 Kotlový buben.....</i>	33
<i>Obr. 14 Výparník.....</i>	34
<i>Obr. 15 Hlavní zavodňovací potrubí.....</i>	35
<i>Obr. 16 Nosná konstrukce membránových stěn a roštu.....</i>	36
<i>Obr. 17 Schéma regulace teploty páry na výstupu z kotle.....</i>	39
<i>Obr. 18 Schéma regulace teploty spalin na výstupu z kotle.....</i>	42

## 13 Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Parametry kotle.....</i>	27
<i>Tab. 2 Specifikace paliva.....</i>	28
<i>Tab. 3 Parametry spalin na výstupu z kotle.....</i>	28
<i>Tab. 4 Charakteristické úrovně hladiny v bubnu.....</i>	38
<i>Tab. 5 Charakteristické hodnoty teploty páry za kotlem.....</i>	40
<i>Tab. 6 Charakteristické hodnoty teploty páry za kotlem.....</i>	40
<i>Tab. 7 Charakteristické úrovně tlaku spalin ve spalovací komoře.....</i>	43