

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2024**

**VOJTĚCH  
SOBOTÍK**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sobotik** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **500338**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Kondenzace spalin u kotlů na biomasu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Condensation of flue gas in biomass boilers**

Pokyny pro vypracování:

Zhodnotte přínos kondenzace spalin pro případ kotle spalujícího biomasu.

Práce bude obsahovat:

1. Zpracování přehledu energetického využití biomasy.
2. Popis technologie kondenzace spalin u biomasových kotlů.
3. Určení účinnosti kotle na biomasu bez kondenzace spalin v závislosti na obsahu vody v palivu.
4. Vyhodnocení přínosu rekuperace tepla využitím kondenzace spalin pro dané řešení.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Havlík, Ph.D. ústav energetiky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2025**

Ing. Jan Havlík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s použitím citované literatury a odborných konzultací.

V Praze dne .....

.....

Podpis autora

## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Vojtěch Sobotík
<b>Název BP:</b>	Kondenzace spalin u kotlů na biomasu
<b>Anglický název:</b>	Condensation of flue gas in biomass boilers
<b>Akademický rok:</b>	2023/2024
<b>Ústav/Odbor:</b>	Ústav energetiky
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Jan Havlík, Ph.D.
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 56 Počet obrázků: 17 Počet tabulek: 13 Počet příloh: 0
<b>Klíčová slova:</b>	Kondenzace, Biomasa, Kotle na biomasu, Spaliny, Stechiometrie spalování, Účinnost, Rekuperace
<b>Keywords:</b>	Condensation, Biomass, Biomass boilers, Flue gas, Combustion stoichiometry, Efficiency, Heat recovery
<b>Anotace:</b>	Bakalářská práce se zabývá získávání tepla ze spalin pomocí kondenzace. Proces probíhá v kondenzačních výměnících, kde jsou ochlazovány spaliny pod teplotu rosného bodu. Práce se skládá z rešeršní a výpočtové části. V teoretické části jsou probírány technologie pro získávání energie z biomasy a následně popisuje samotnou kondenzaci. Výpočtová část je rozdělena na 2 části: na výpočet účinnosti kotle a na samotnou rekuperaci tepla ze spalin.
<b>Abstract:</b>	The bachelor thesis deals with heat recovery from flue gases by condensation. The process takes place in condensing heat exchangers where the flue gases are cooled below the dew point temperature. The thesis consists of a research and calculation part. The theoretical part discusses the technologies for energy

recovery from biomass and then describes the condensation itself. The computational part is divided into 2 parts: the calculation of the boiler efficiency and the heat recovery from the flue gas itself.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za věnovaný čas a za odborné a cenné rady při konzultacích. Také bych rád poděkoval své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a veličin .....	1
1. Úvod.....	4
2. Biomasa .....	5
2.1. Výhody a nevýhody využití v energetice .....	5
2.2. Typy biomasy .....	6
2.3. Průmysl v České republice .....	7
2.4. Technologie vhodné pro získávání energie z biomasy .....	9
3. Kondenzace spalin.....	16
3.1. Kondenzace .....	16
3.2. Účinnost běžných kotlů na biomasu.....	19
3.3. Úspora energie.....	21
4. Výpočet celkové účinnosti kotle .....	27
4.1. Přepočtení paliva .....	28
4.2. Stechiometrie spalování.....	29
4.3. Entalpie spalin .....	33
4.4. Účinnost kotle.....	35
5. Výpočet tepelného přínosu kondenzací spalin .....	37
5.1. Teplota rosného bodu .....	38
5.2. Ochlazování spalin .....	39
5.3. Závislost získaného tepla na teplotě spalin .....	42
5.4. Zvýšení výkonu .....	43
5.5. Zhodnocení výsledků .....	44
6. Závěr.....	46
Bibliografie.....	47

## Seznam použitých symbolů a veličin

Kotel s bublinkující fluidní vrstvou	<i>BFB</i>
Biologicky rozložitelný komunální odpad	<i>BRKO</i>
Biologicky rozložitelný průmyslový odpad	<i>BRPO</i>
Kotel s cirkulující fluidní vrstvou	<i>CFB</i>
Obnovitelný zdroj energie	<i>OZE</i>
Obsah vody v původním stavu	$W_r$ [%]
Obsah popela v původním stavu	$A_r$ [%]
Obsah popela v suchém stavu	$A_d$ [%]
Obsah uhlíku v suchém stavu bez popela	$C_{daf}$ [%]
Obsah uhlíku v suchém stavu	$C_d$ [%]
Obsah uhlíku v původním stavu	$C_r$ [%]
Obsah vodíku v suchém stavu bez popela	$H_{daf}$ [%]
Obsah vodíku v suchém stavu	$H_d$ [%]
Obsah vodíku v původním stavu	$H_r$ [%]
Obsah dusíku v suchém stavu bez popela	$N_{daf}$ [%]
Obsah dusíku v suchém stavu	$N_d$ [%]
Obsah dusíku v původním stavu	$N_r$ [%]
Obsah kyslíku v suchém stavu bez popela	$O_{daf}$ [%]
Obsah kyslíku v suchém stavu	$O_d$ [%]
Obsah kyslíku v původním stavu	$O_r$ [%]
Obsah síry v suchém stavu bez popela	$S_{daf}$ [%]
Obsah síry v suchém stavu	$S_d$ [%]
Obsah síry v původním stavu	$S_r$ [%]
Minimální objem kyslíku potřebný pro spálení 1 kg paliva	$O_{O2min}$ [ $Nm^3/kg_{pal}$ ]
Minimální objem suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva	$O_{minVS}$ [ $Nm^3/kg_{pal}$ ]
Minimální objem vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva	$O_{minVV}$ [ $Nm^3/kg_{pal}$ ]
Objem vodní páry	$O_{H2O}^V$ [ $Nm^3/kg_{pal}$ ]
Objem oxidu uhličitého ve spalinách	$O_{CO2}$ [ $Nm^3/kg_{pal}$ ]
Objem oxidu siřičitého ve spalinách	$O_{SO2}$ [ $Nm^3/kg_{pal}$ ]
Objem dusíku ve spalinách	$O_{N2}$ [ $Nm^3/kg_{pal}$ ]
Objem argonu a dalších vzácných plynů ve spalinách	$O_{Ar}$ [ $Nm^3/kg_{pal}$ ]
Minimální objem suchých spalin	$O_{minSS}$ [ $Nm^3/kg_{pal}$ ]



Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin	$O_{H_2O}^S [Nm^3/kg_{pal}]$
Minimální objem vlhkých spalin	$O_{minSV} [Nm^3/kg_{pal}]$
Objem vlhkých spalin z 1 kg paliva	$O_{SV} [Nm^3/kg_{pal}]$
Objem vodní páry ve spalinách	$O_{H_2O} [Nm^3/kg_{pal}]$
Objem suchých spalin	$O_{SS} [Nm^3/kg_{pal}]$
Objem vodní páry ve spalinách po kondenzaci	$O_v [Nm_v^3/kg_{pal}]$
Objem zkondenzované vodní páry	$O_{kon} [Nm_v^3/kg_{pal}]$
Entalpie spalin o dané teplotě s přebytkem vzduchu	$I_S^{t,\alpha} [kJ/kg_{pal}]$
Entalpie stechiometrických spalin	$I_{minS}^t [kJ/kg_{pal}]$
Entalpie minimálního množství vzduchu	$I_{minV}^t [kJ/kg_{pal}]$
Entalpie suchých spalin o dané teplotě s přebytkem vzduchu	$I_{SS\_měr}^{t,\alpha} [kJ/kg_{pal}]$
Entalpie stechiometrických suchých spalin	$I_{minSS}^t [kJ/kg_{pal}]$
Entalpie vlhkých spalin	$I_{SV}^{\alpha,t} [kJ/kg_{pal}]$
Objemová entalpie suchých spalin	$I_{SS\_obj}^t [kJ/Nm_{SS}^3]$
Objemová entalpie vodní páry	$I_{v\_obj}^t [kJ/Nm_v^3]$
Entalpie syté páry o dané teplotě	$I_{v\_měr}^t [kJ/kg_v]$
Objemová entalpie vlhkých spalin	$I_{SV\_obj}^t [kJ/Nm_{SV}^3]$
Objemová entalpie kondenzátu	$I_{kon\_obj}^t [kJ/Nm_{kon}^3]$
Měrná entalpie kondenzátu	$I_{kon\_měr}^t [kJ/kg_{kon}]$
Entalpie kondenzátu	$I_{kon}^t [kJ/kg_{pal}]$
Přebytek vzduchu	$\alpha [-]$
Podíl vodní páry připadající na 1 Nm <sup>3</sup> suchého vzduchu	$\alpha_v [-]$
Relativní vlhkost	$\varphi [%]$
Účinnost	$\eta [%]$
Celkový tlak	$p_c [MPa]$
Parciální tlak syté vodní páry pro danou teplotu	$p'' [MPa]$
Parciální tlak vody na výstupu	$p_{H_2O\_kon} [MPa]$
Výkon kotle	$Q_v [kW]$
Energie v palivu	$Q_{pal} [kW]$
Výhřevnost paliva	$Q_i [kJ/kg]$
Spalné teplo paliva	$Q_s^{daf} [kJ/kg]$
Získané teplo	$Q_{kon} [kJ/kg_{pal}]$
Přírůstek výkonu	$P [kW]$

Výhřevnost hořlaviny	$Q_{ci} [kJ/kg]$
Komínová tepelná ztráta	$Z_k [-]$
Tepelná ztráta chemickým nedopalem	$Z_{co} [-]$
Tepelná ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	$Z_f [-]$
Tepelná ztráta sdílením tepla do okolí	$Z_{sv} [-]$
Tepelná ztráta mechanickým nedopalem	$Z_c [-]$
Podíl hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků	$C_i [-]$
Podíl popela z celkového množství v palivu	$X_i [-]$
Obsah kyslíku pro referenční stav spalin	$O_{2ref} [-]$
Koncentrace oxidu uhelnatého ve spalinách	$CO_{mg} [mg/Nm^3]$
Měrná entalpie oxidu uhličitého	$i_{CO2} [kJ/kg_{pal}]$
Měrná entalpie oxidu siřičitého	$i_{SO2} [kJ/kg_{pal}]$
Měrná entalpie dusíku	$i_{N2} [kJ/kg_{pal}]$
Měrná entalpie argonu a dalších vzácných plynů	$i_{Ar} [kJ/kg_{pal}]$
Měrná entalpie vody	$i_{H2O} [kJ/kg_{pal}]$
Měrná entalpie popílku	$i_{popilek} [kJ/kg_{pal}]$
Měrná entalpie suchého vzduchu	$i_{sv} [kJ/kg_{pal}]$
Poměrné zastoupené popela v úletu z ohniště	$a_{\dot{u}} [-]$
Teplota rosného bodu	$t_{RB} [^{\circ}C]$

# 1. Úvod

V dnešní době čím dál tím více vystupuje do popředí výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů, jelikož se jedná o nevyčerpatelný zdroj energie. Biomasa je sama o sobě dnes velmi používaná, jelikož se z ní nevyrábí pouze elektrická energie, ale využívá se i například pro výrobu biopaliv, bioplynu nebo v potravinářství. Pokud budeme biomasu srovnávat s černým nebo hnědým uhlím, tak biomasa má výrazně menší obsah uhlíku a vyšší vlhkost. Oproti tomu uhlí má větší výhřevnost, a i samotné spalování je efektivnější. Na druhou stranu obsahuje větší množství síry, které je nepříznivé pro životní prostředí, a tudíž po spalování uhlí musí dojít k tzv. odsiřování.

Cílem této bakalářské práce je zjistit, zdali se zvýší efektivita výroby energie z biomasy pomocí kondenzace spalin. Pokud se pro spalování v kotlích používají nekvalitní paliva, které mají vyšší vlhkost, může být spalování neefektivní a velké množství energie odejde komínem ven. Po instalaci kondenzačního výměníku do topného systému lze zvýšit výkon kotle i za použití vlhčího paliva. V kondenzátorech dochází k ochlazení vodní páry ve spalinách pod tzv. teplotu rosného bodu, čímž dojde ke kondenzaci spalin, při které se uvolní velké množství tepelné energie.

Tato práce se rozděluje na 2 části: rešeršní a výpočtovou. V rešerši bakalářské práce jsou popsány základní informace o biomase, dále technologie, které získávají energii z biomasy a následně se zaměřuje přímo na kondenzační výměníky. Ve výpočtové části je nejprve vypočtená účinnost kotle bez zapojeného kondenzátoru a poté je popsán tepelný přínos po aplikaci kondenzačního výměníku.

## 2. Biomasa

Biomasu lze definovat jako organický materiál, který je získáván z živých organismů jako jsou rostliny a zvířata. K výrobě energie se nejvíce používá odpadní biomasa ze zemědělské a průmyslové činnosti nebo záměrně pěstovaná biomasa. V porovnání s fosilními palivy má velkou výhodu v krátkodobé obnovitelnosti. Je nutné ale brát na vědomí, že z hlediska energetiky je důležitý jen takový druh biomasy, který je energeticky využitelný. Využitelnou energii z tohoto druhu biomasy je možné získávat buď přímým (spalování) nebo nepřímým (přeměna na biopalivo) způsobem. Pojem „biomasa rostlinného původu“ lze taky definovat jako tzv. fytomasa. K té se převážně řadí dřeviny, dřevní odpad nebo obilí. Mezi energetické dřeviny je možné konkrétně zařadit například vrbu, akát, topol, platan a ostatní rychle rostoucí dřeviny, které se vysazují převážně pro energetické účely. Samozřejmě lze použít veškerou rostlinnou hmotu, ale je nutné si uvědomit, že každý typ rostliny má jiné vlastnosti a chemické složení. Od toho se bude odvíjet i výhřevnost paliva a kvalita spalování. [1] [2] [3]

### 2.1. Výhody a nevýhody využití v energetice

Biomasa je obnovitelný zdroj energie, jejíž počáteční energie pochází ze slunce a lze za relativně krátký čas znovu vypěstovat. Také je velmi výhodná z pohledu produkce CO<sub>2</sub>. Při správném spalování může být množství uvolněných skleníkových plynů menší než u fosilních paliv. Z tohoto důvodu je biomasa velice příznivá varianta pro životní prostředí. Z hlediska obsahu nepříznivých plynů pro přírodu se biomasa řadí mezi neutrální paliva, jelikož stejné množství CO<sub>2</sub>, který se při spalování vyprodukuje, na sebe rostlina naváže z atmosféry při svém vývoji. Bohužel biomasa s sebou nese i řadu nevýhod. Jednou z nich je např. orná půda. Pokud se cíleně pěstuje energetická biomasa, zabírá tím plochu pro rostliny, ze kterých se běžně získává potrava (např. obiloviny, ovoce, zelenina). [2] [1]

Výběr vhodných technologií pro výrobu elektrické a tepelné energie z biomasy je mnoho a záleží na mnoha kritériích jako je dostupnost, cena, efektivita a mnoha dalších. Biomasu lze členit dle energetického využití na:

- Přímý spalování biomasy pro výrobu tepelné energie (dřevo, dřevní odpady, sláma).
- Zpracování na kvalitnější spalovací produkty – zušlechťování (pelety, brikety).
- Kombinovaná výroba elektřiny a tepla – kogenerace. [4] [5]

## 2.2. Typy biomasy

Samotnou biomasu lze dělit na několik kategorií. Obecně se nejčastěji v energetice používá tzv. dřevní biomasa neboli dendromasa a lze jí rozdělit konkrétně na dvě skupiny, a to na cíleně pěstovanou biomasu a na odpadní biomasu. Dále se dělí dle vlastností. [1] [5]

### 2.2.1. Cíleně pěstovaná biomasa

Jedná se především o rychle rostoucí dřeviny a bylinnou biomasu. Vlastnosti, které jsou u tohoto typu nejvíce žádoucí, jsou rychlý a snadný výsev. Příklady viz Tabulka 1.

### 2.2.2. Odpadní biomasa

Odpadní biomasa je tvořena zbytky, vedlejšími produkty a odpadem ze zpracování primárních zdrojů rostlinné či živočišné biomasy. Příklady viz Tabulka 2.

*Tabulka 1 – Biomasa pěstovaná pro energetické účely [5]*

Rychle rostoucí dřeviny	<ul style="list-style-type: none"><li>• Topol</li><li>• Platan</li><li>• Olše</li></ul>
Rostliny bylinného charakteru	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kostřava</li><li>• Amaranthus</li><li>• Konopí</li></ul>
Travní porosty	<ul style="list-style-type: none"><li>• Chrastice</li><li>• Sloní tráva</li></ul>
Obiloviny	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pšenice</li><li>• Ječmen</li></ul>
Olejnate rostliny	<ul style="list-style-type: none"><li>• Řepka olejná</li><li>• Slunečnice</li></ul>
Škrobo-cukernaté rostliny	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cukrová řepa</li><li>• Cukrová třtina</li><li>• Brambory</li></ul>

**Tabulka 2 – Odpadní biomasa [5]**

Z rostlinné výroby	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Odpady z vinic</li> <li>• Kukuřičná sláma</li> <li>• Řepková sláma</li> </ul>
Z živočišné výroby	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hněj</li> <li>• Močůvka</li> <li>• Kejda</li> </ul>
Z těžby a zpracování dřeva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Větve</li> <li>• Kůra</li> <li>• Piliny</li> </ul>
Biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zbytky potravin</li> <li>• Papírové obaly</li> </ul>
Biologicky rozložitelný průmyslový odpad (BRPO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Odpady z jatek</li> <li>• Odpady z výroby cukru a mouky</li> <li>• Odpady z výroby mouky</li> </ul>
Splašky z kanalizací	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voda z kanalizace</li> </ul>

### 2.2.3. Rozdělení dle vlastností

- Suchá biomasa – přímé spalování (např. dendromasa).
- Vlhká biomasa– používá se k výrobě bioplynu (např. tekuté odpady).
- Speciální biomasa– výroba bionafty a biolíhu (řepka olejná nebo brambory). [5]

## 2.3. Průmysl v České republice

V roce 2010 konečná spotřeba elektrické energie v České republice z obnovitelných zdrojů byla 10,52 %. Za 7 let se tato bilance zvýšila téměř o 5 %. Hrubá výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů se v roce 2020 podílela v ČR na celkové výrobě elektřiny 17,3 %. Tím docílila požadovaného podílu v rámci EU pro rok 2020, který byl 13 %. Do roku 2030 je cíl zvýšení až na 20,8 %, což znamená, že využití biomasy bude v budoucnu daleko větší.

Biomasa, podle celkové získané energie z daného obnovitelného zdroje pro rok 2021, tvoří 66,14 % podílu na energii ze všech OZE jak pro domácnost, tak i mimo něj. Větší část využití zaujímá domácnost – viz Tabulka 3. [6]

*Tabulka 3 - Celková energie z obnovitelných zdrojů v roce 2021 [6]*

	<b>Celková energie z OZE [GJ]</b>	<b>Podíl na energii z OZE [%]</b>
Biomasa mimo domácnost	58 468 362	26,49
Biomasa v domácnosti	87 518 857	39,65
<b>Biomasa celkem</b>	<b>145 987 219</b>	<b>66,14</b>
<b>OZE celkem</b>	<b>220 716 852</b>	<b>100,00</b>

V České republice je pro výrobu elektrické energie nejvíce používaná dřevní štěpka. Vzniká buďto z odpadu během zpracování dřeva nebo cíleným drcením. Celkový podíl výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů tvoří biomasa 24,48 % a podíl na celkové hrubé výrobě elektřiny je 3,14 %. V Tabulce 4 můžeme vidět i podíly z různých typů. [6]

*Tabulka 4 - Výroba elektřiny z biomasy v roce 2021 [6]*

	<b>Hrubá výroba elektřiny [MWh]</b>	<b>Podíl na elektřiny z OZE [%]</b>	<b>Podíl na hrubé výrobě elektřiny [%]</b>
Palivové dříví	77	0,00	0,00
Štěpka	1 430 219	13,35	1,68
Celulózové výluhy	888 974	8,3	1,05
Rostl. materiály	104 902	0,98	0,12
Pelety a brikety	239 220	2,23	0,28
Kapalná biopaliva	1 201	0,01	0,00
Ostatní biomasa	0	0,00	0,00
<b>Biomasa celkem</b>	<b>2 408 520</b>	<b>24,48</b>	<b>3,14</b>

## 2.4. Technologie vhodné pro získávání energie z biomasy

Energii z biomasy je možné získávat různými způsoby. Pro správný výběr technologie se rozhoduje na základě fyzikálních a chemických vlastností, z nichž nejdůležitější je vlhkost. Množství vody obsažené v biomase určuje, jaký způsob zpracování se použije. Samotné procesy se potom dělí na mokré (obsah sušiny méně jak 50 %) a suché (obsah sušiny více jak 50 %).

### 2.4.1. Termochemické (suché) procesy

Dělí se do 3 skupin:

- Spalování – jedná se o nejjednodušší metodu, která probíhá za vysokých teplot s dostatečným množstvím dodávaného kyslíku. Produktem je tepelná energie, která se následně používá pro výrobu elektrické energie. Samotný proces probíhá ve 2 podobách:
  - Spalování na roštu.
  - Spalování na fluidní vrstvě.
- Zplyňování – za vysokého množství dodávaného tepla zde dochází k přeměně uhlíkatého materiálu v pevném či kapalném skupenství, při kterém vzniká výhřevný energetický plyn. Vzniklý produkt v sobě obsahuje výhřevné složky ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  a další minoritní sloučeniny), doprovodné složky ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ) a znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry a další).
- Pyrolýza – proces, při kterém dochází k termickému rozkladu organických látek bez dodávání kyslíku. Technologie transformuje dřevo nebo jiné odpadní materiály na látky s vyšší energetickou úrovní jakou jsou například plyny nebo kapaliny. Pyrolýzu lze rozdělit podle dosahovaných teplot:
  - Nízkoteplotní – do  $500\text{ }^{\circ}C$ .
  - Středněteplotní – od  $500\text{ }^{\circ}C$  do  $800\text{ }^{\circ}C$ .
  - Vysokoteplotní – od  $800\text{ }^{\circ}C$ . [5] [4] [1]



## 2.4.2. Biochemické (mokr ) procesy

Tyto technologie se zabývají zpracováním vlhkého organického odpadu pocházejícího ze zemědělství. D li se do 3 skupin:

- Metanolov  kvašení – proces, při kter m se rozkládají organick  látky bez dodávaného kyslíku (anaerobní fermentace). Probíhá v uzavřených nádobách. Metanolov  kvašení se využívá k výrobě elektrické energie nebo bioplynu. Ten se následně využívá ve spalovacích motorech.
- Alkoholov  kvašení – transformace rostlinných polysacharidů na alkohol a oxid uhličit y probíhající v uzavřen  n dob .
- Kompostování – organick y materiál se přeměňuje na kompost za přítomnosti kyslíku. [5] [4] [1]

## 2.4.3. Fyzik ln  chemick  procesy

Vznik kapalných biopaliv. Následnou esterifikací se získa tzv. bionafta.

- Esterifikace – Chemick  reakce ethanolu s kyselinou nebo s jejím derivátem, při které vzniká ester a voda.
  - Výroba ethylalkoholu – Brambory, obilí, cukrov  řepa.
  - Výroba olejů – Řepka olejn  (bionafta), slunečnice, len. [5] [4] [1]

V této p aci jsou nejzásadnější termick  procesy, konkr tn  spalování. Pro tuto skupinu procesů se používají spalovací kotle na biomasu.

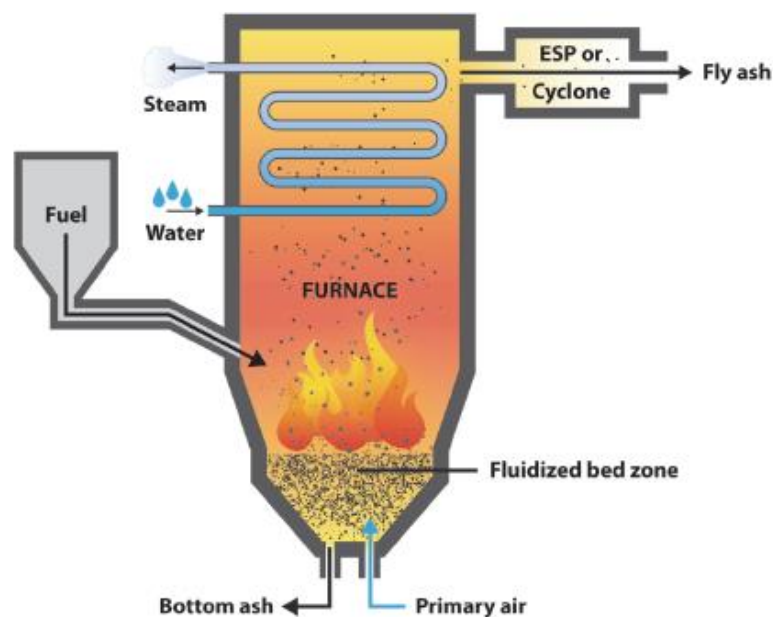
## 2.4.4. Kotle na biomasy

Při probíhající m procesu je nutno kontrolovat optim ln  podmínky prostředí a vlastnosti výstupních spalin, především emise oxidu uhelnatého a tuhých látek. Ve srovnání s fosilními palivy je při spalování biomasy charakteristick y velk  plamen a vysok  podíl prchav  hořlaviny. Jak uř bylo jednou zm něno (viz kap. 2.4.1.), spalovací procesy probíh j  ve dvou podobách, a to na spalování na rořtu a na fluidní vrstvě. V dneřn  době se p ev zn  používájí kotle s rořtem, ale i spalování na fluidní vrstvě s sebou nese mnoho výhod. [7]

### 2.4.4.1. Fluidní kotle

Fluidní kotle využívají principu spalování paliv na fluidní vrstvě. Ta je uzpůsobená tak, aby podmínky zajišťovaly rovnoměrné hoření paliva v celém objemu kotle, což vede k lepšímu vyhoření paliva a následně k větší účinnosti zařízení. Používá se zde kombinace spalování fosilních paliv se štěpkou, odpadním dřevem, ale i s dalšími druhy biopaliv. Důvod je převážně ekonomický, jelikož jsou menší náklady na palivo. Dále se dělí 2 kategorie:

- Atmosférické fluidní kotle s bublinkující fluidní vrstvou (BFB).
- Atmosférické fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou (CFB). [7] [8]



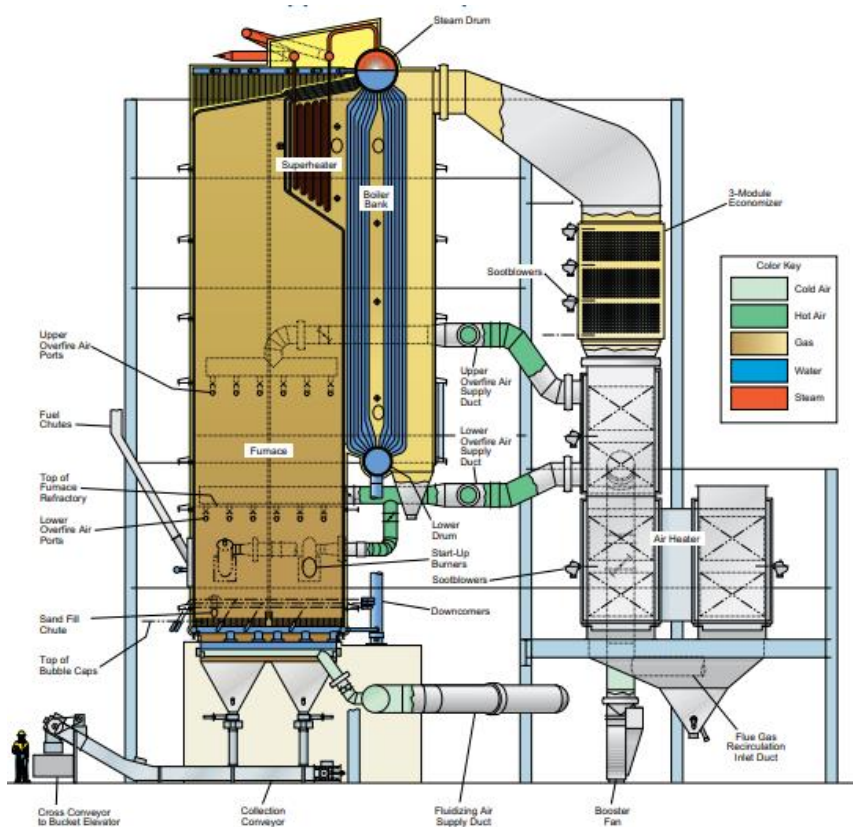
Obrázek 1 - Schéma fluidního kotle [9]

#### 2.4.4.1.1. Princip fungování fluidních kotlů

Uvnitř fluidního kotle probíhá proces, který se nazývá fluidizace. Dochází k převedení pískovcového lože do vysokorychlostního proudu plynu. Tento typ proudu se nazývá tzv. fluidizační médium, což během spalování bývá ve většině případech vzduch. Při kombinovaném spalování fosilních paliv a biomasy vzniká směs, jenž má vlastnosti tuhého tělesa i tekutiny. Takto vzniklá směs se spaluje při teplotách 800 až 900 °C na fluidním lůžku, které se z 95–98 % skládá z inertního materiálu (např. písek) a zbylých 2–5 % tvoří hořlavý materiál. [7] [9]

### 2.4.4.1.2. Kotel s bublinkující fluidní vrstvou

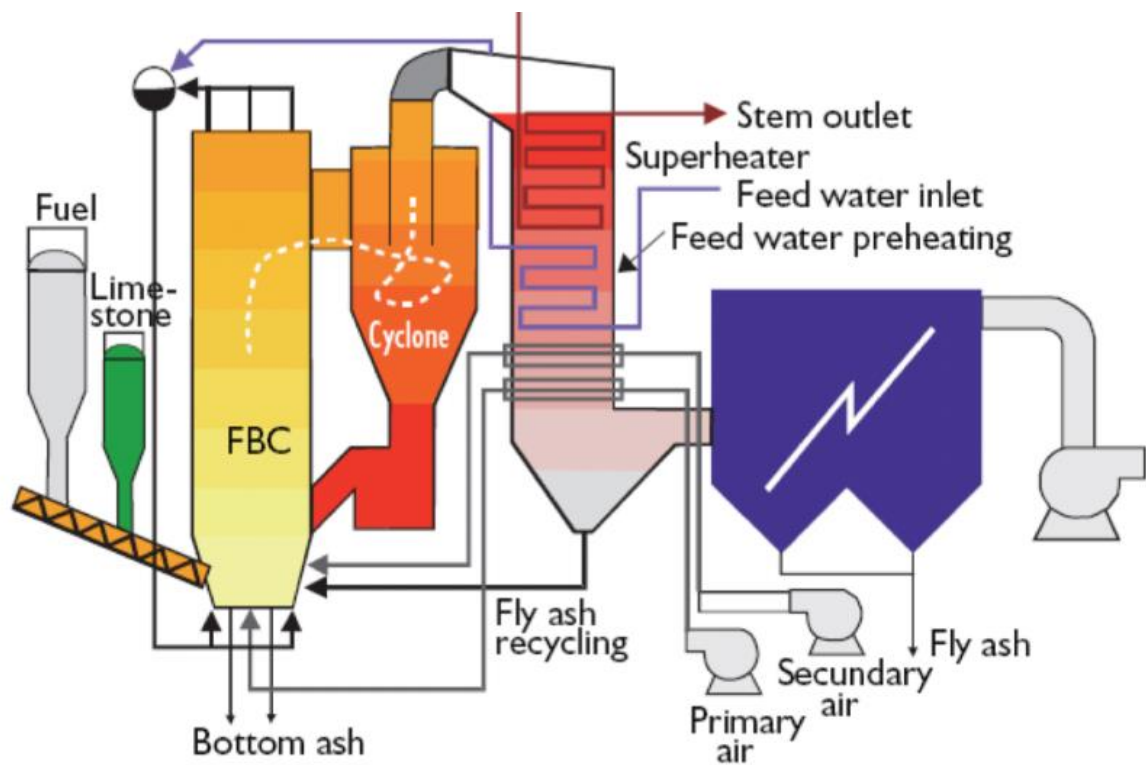
V typickém BFB kotli probíhají 3 mechanismy: sálání, plynná konvekce a přenos tepla kontaktem pevných částic. Před samotným spalováním se lůžko nejdříve zahřívá (nejčastěji zemním plynem) a až poté dochází k dávkování biomasy a následně jeho spalování. Kotle BFB ve většině případech pracují při nižších spalovacích teplotách 800–850 °C, což většinou vede k nižším emisím NO<sub>x</sub>. Fungování samotného ohniště v bublinkující vrstvě se dále dělí podle tlaku na 2 typy, a to buď na přetlakovou nebo atmosférickou fluidní vrstvu. [10] [1]



Obrázek 2 – Kotel s bublinkující fluidní vrstvou [11]

### 2.4.4.1.3. Kotel s cirkulující fluidní vrstvou

Klíčový prvek, který kotle s cirkulující fluidní vrstvou mají, je schopnost udržovat proudící písek uvnitř lože. To má za následek lepší spalování paliva. CFB kotle mají další řadu výhod jako je např. velká účinnost, vysoká flexibilita spalovacího paliva a minimální množství vyprodukovaných emisních složek. CFB spalovací zařízení se většinou skládá z rychlé fluidní kolony, primárního cyklonu pro recyklaci pevných látek a potrubí pro regulaci rychlosti tuhých látek. [12]



Obrázek 3 - Kotel s cirkulující fluidní vrstvou [13]

#### **2.4.4.2. Kotle s roštem**

Používají se v průmyslu i domácím vytápění. V současné době se nové roštové kotle na uhlí téměř nestaví. Dnes se vyrábí převážně kotle na biomasu (dřevo, sláma, pelety) a na komunální odpad. Spalování na roštu probíhá ve 2 vrstvách, a to přímo na roštu (tuhý uhlík) a v prostoru nad vrstvou paliva (prchavá hořlavina). Funkcí roštu je vytvářet a udržovat vrstvu paliva požadované tloušťky a prodyšnosti při co nejmenším propadu palivových zrn a zajišťovat přívod vzduchu pro správné a rovnoměrné spalování. Rošty lze dělit podle přemístování paliva v ohništi na 3 druhy:

- Rošty s nehybnou vrstvou (pevné rošty).
- Rošty s občasným přemístováním paliva (stupňové a přesuvné).
- Rošty s trvalým přemístováním paliva (pásové a řetězové).

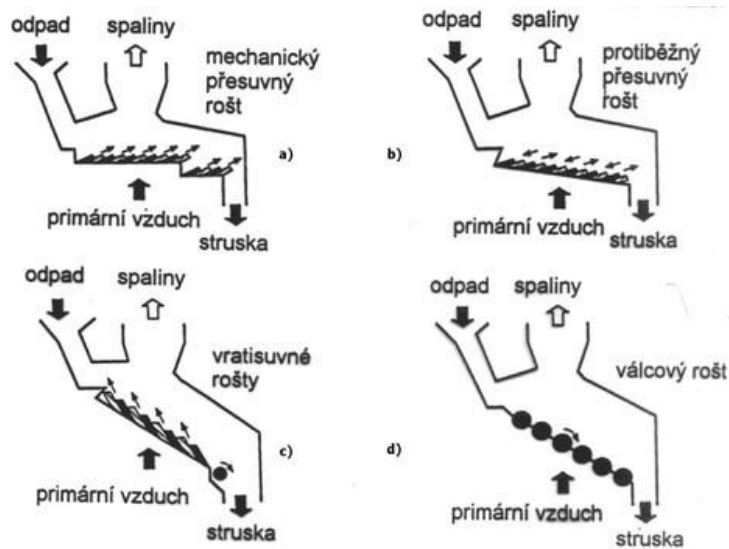
Pevné rošty většinou mají velmi malé výkony a vzniklý popel se musí odstraňovat manuálně. Naopak rošty, které mají funkci přemístování, jsou většinou výkonnější, palivo se v ohništi posouvá a popel se vynáší mechanicky. [8]

##### **2.4.4.2.1. Pevné rošty s nehybnou vrstvou paliva**

Tento typ kotle se ve většině případech používá v domácnostech u malých kotlů pro lokální vytápění. Rošty jsou složeny z bezpropadových roštnic se spodním prostorem pro přívod vzduchu. Pro správné dopálení uvolňované hořlaviny je potřeba, aby byl nad roštem další přívod pro sekundární vzduch. Tento typ má nevýhodu, že vznikají velké ztráty mechanickým nedopalem. [8]

##### **2.4.4.2.2. Rošty s občasným přemístováním paliva**

Roštnice jsou zde tvořeny tak, aby bylo možné s nimi mechanicky pohybovat. Občasným, pravidelným či nepravidelným pohybem roštnic dochází k rozrušování spečené vrstvy paliva, promíchávání paliva, posunu paliva a odvodu popele z ohniště. Dělí se na rošty vratisuvné, rošty s válcovými roštnicemi, protiběžné přesuvné rošty nebo mechanické přesuvné rošty (viz Obrázek 4). [8]



Obrázek 4 - Typy posuvných roštů [8]

### 2.4.4.2.3. Rošty s trvalým přemístováním paliva

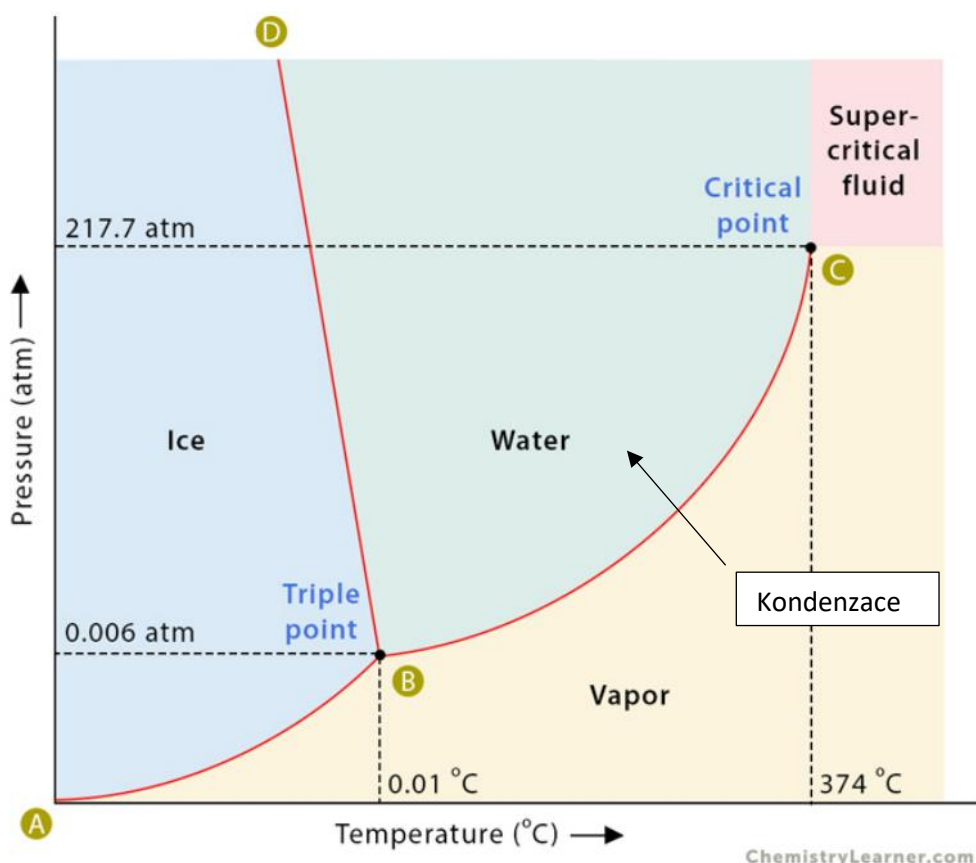
Používá se u kotlů, které dosahují největších výkonů. Rošt je tvořen nekonečným pásem, který neustále posouvá palivo dál do ohniště. Pásový rošt má roštnice upevněny na příčných tyčích, které jsou unášeny dvěma postranními řetězy. Rošt je zahříván pouze v horní části, zatímco ve spodní části je chlazen. Z tohoto důvodu lze použít výhřevnější palivo, aniž by docházelo k opálení roštnic. [8]

### 3. Kondenzace spalin

Dnes je možné se setkat s kondenzací i v domácnostech, a to v plynových kotlích pro ohřev vody. Kondenzační plynové kotle se od klasických liší především tím, že energie, která se vyskytuje ve spalinách a za normálních podmínek by vyšla komínem ven, je využita pro ohřev vody. Tím se zvyšuje účinnost topného systému a zároveň snižuje emisní složka ve spalinách. Obdobný proces lze použít i v kotlech na biomasu.

#### 3.1. Kondenzace

Kondenzace je proces, při kterém přichází teplý vlhký vzduch do kontaktu se studeným tělesem, který se následně přemění z plynného skupenství do kapalného (opak vypařování). Je způsobena změnou tlaku a teploty. Teplý vzduch, který má schopnost zadržovat více vlhkosti než studený, tuto schopnost ztrácí při kontaktu se studenými tělesy a vzniká tzv. kondenzát. [14] [15]



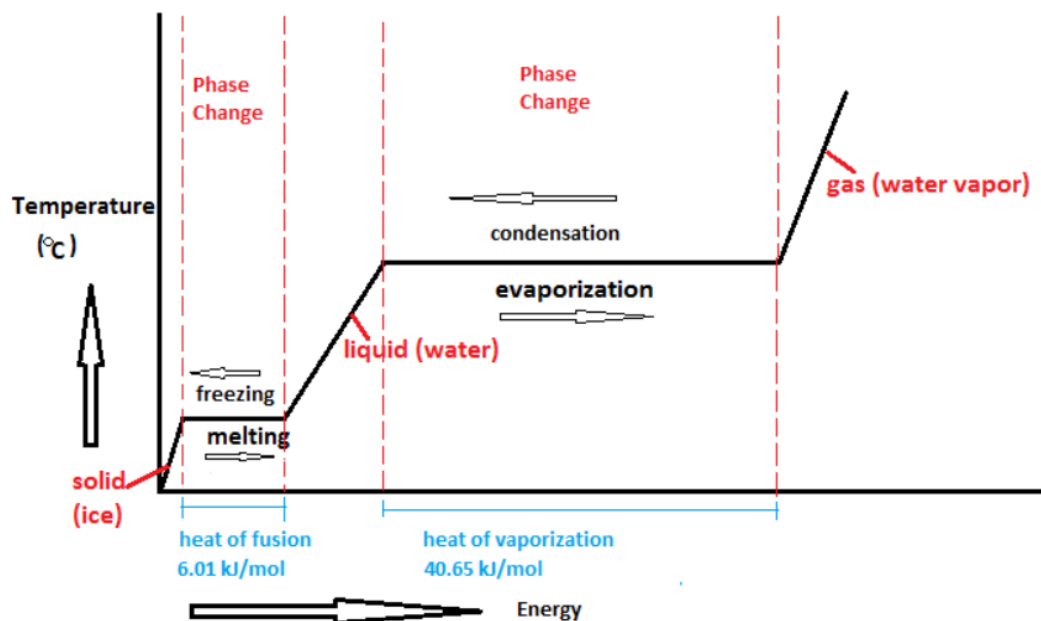
Obrázek 5 - Fázový diagram vody [15]

Fázový diagram znázorňuje vztah mezi tlakem a teplotou, a určuje různé fáze vody. Tento vztah je pro účely této práce důležitý, jelikož dokážeme předpovědět, jak se bude voda chovat, pokud

postupujeme podél konstantního tlaku nebo teploty. V diagramu (viz Obrázek 5) je šipkou znázorněna kondenzace. Pro námi zkoumanou problematiku je důležitá tzv. koexistenční křivka, na které se objevuje oblast nasycené vodní páry. Počátek má v trojném bodě a konec v kritickém bodě. Oblast nasycené vodní páry lze chápat jako termodynamickou rovnováhu mezi kapalinou a plynem při stejném tlaku a teplotě. [15] [16]

### 3.1.1 Latentní teplo

Latentní teplo je energie, která se uvolňuje z tělesa, aby změnila svou fázi (př. roztavení ledu, vypaření kapaliny, aj.). Na Obrázku 6 lze pozorovat vztah teploty a energie. Při teplotě 0 °C je studený led, kterému je přidáváno teplo, což zapříčiní nárůst teploty tělesa. Tento typ energie se označuje jako citelné teplo. Jakmile začne tát a měnit se fáze ledu, přidávané teplo je označované jako latentní teplo. V grafu je tento proces znázorněný vodorovnými přímkami. [17]



Obrázek 6 - Závislost teploty na dodávané energii [17]

Pro naši problematiku je důležité množství tepla, které je potřebné ke kondenzaci. Tato hodnota je definovaná jako kondenzační skupenské teplo a pro jednotku hmotnosti jako měrné skupenské kondenzační teplo. Každá látka má jinou hodnotu měrného skupenského tepla a v Tabulce 5 jsou vypsány jejich hodnoty. [1] [16]

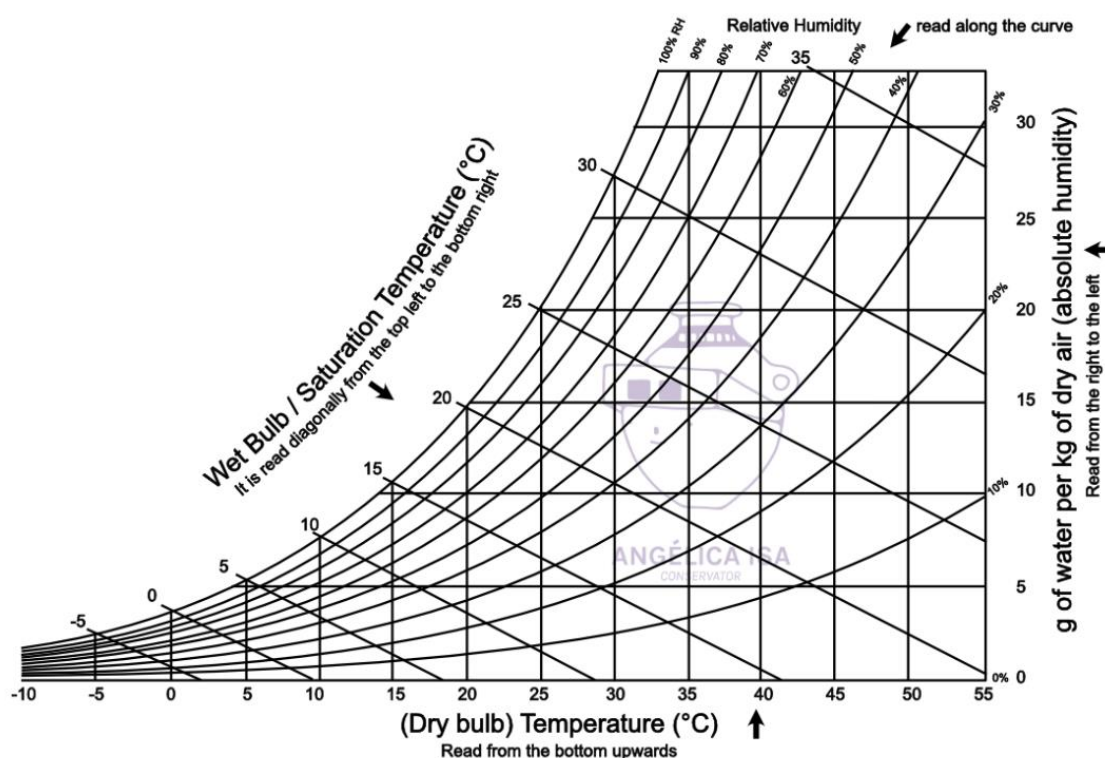


Tabulka 5 – Hodnoty měrných skupenských látek pro určité látky [16]

Látka	Měrné skupenské kondenzační teplo [kJ/kg]
Vodík	454
Helium	20,6
Dusík	198
Kyslík	213
Voda	2256
Oxid uhličitý	574

### 3.1.2. Rosný bod

Rosný bod je hodnota teploty, při které vodní pára začíná kondenzovat na vodu. Když teplota klesne pod hodnotu rosného bodu, přebytečná vlhkost se uvolní a vznikne kapalná voda. Existuje vztah mezi relativní vlhkostí a rosným bodem. Relativní vlhkost lze definovat jako procentuální vyjádření množství vody přítomné ve vzduchu. Pokud má vzduch vysokou relativní vlhkost, blíží se i teplotě rosného bodu. Z toho vyplývá, že teplota vzduchu se 100 % vlhkostí je rovna teplotě rosného bodu. [14]



Obrázek 7 - Psychrometrický graf [18]

Psychrometrický graf znázorňuje fyzikální a tepelné vlastnosti vlhkého vzduchu, pomocí něhož lze určit neznámé vlastnosti, například i teplotu rosného bodu. [18]

## 3.2. Účinnost běžných kotlů na biomasu

Pokud se běžný spotřebitel rozhodne zakoupit kotel na biomasu, tak od výrobce dostane předepsané provozní vlastnosti, který kotel má, včetně účinnosti. Tyto hodnoty jsou ale udávány pouze jako jeho maximální potenciál. Toho je dosaženo právě tehdy, když se podmínky přiblíží těm, za kterých byl kotel testován. Tím je myšleno zapojení na kvalitní komín s regulovaným tahem, používání garančního paliva, dostatečná údržba a kvalitní obsluha. Pokud jedna z těchto podmínek nebude splněna, účinnost okamžitě začne klesat. Pro výpočet účinnosti kotlů existují 2 způsoby, buď přímá nebo nepřímá metoda. [19]

### 3.2.1. Přímá metoda

Jedná se o podíl tepelného výstupu a vstupu. V případě tepelného vstupu se jedná o tepelnou energii v palivu a výstup je možné určit jako teplo předané vodě nebo páře. Platí tento vztah:

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_{pal}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

### 3.2.2. Nepřímá metoda

Zde je výpočet založen na zohlednění všech tepelných ztrát kotle. Od ideálního kotle, který by měl 100% účinnost se odečítají jednotlivé ztráty. Tudiž platí vztah:

$$\eta = 100 - \sum Z_i \quad [\%] \quad (2)$$

Kde  $\sum Z_i$  je součet všech ztrát. Pro něj platí vztah:

$$Z_i = Z_c + Z_{co} + Z_{sv} + Z_f + Z_k \quad [\%] \quad (3)$$

Při samotném spalování dochází k teplotním ztrátám. Mezi jednotlivé ztráty se řadí ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta), ztráta plynným nedopalem, ztráta mechanickým nedopalem a ztráta sdílením tepla do okolí. [19] [20]

### 3.2.2.1. Komínová ztráta

Komínovou ztrátu lze definovat jako odvedené teplo, které spaliny vedou do komína. Obecně ji lze vyjádřit poměrem unikajícího tepla ve spalinách k výhřevnosti spalovaného paliva. Platí tento vztah [20]:

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_s^{t_{k,\alpha}} - I_s^{t_{vz,\alpha}}}{Q_i} \quad [-] \quad (4)$$

Komínová ztráta je při běžném provozu obvykle největší ze všech ztrát. Její velikost lze ovlivnit 2 způsoby: snížením teploty spalin za kotlem nebo minimalizací součinitele přebytku vzduchu. [19] [21]

### 3.2.2.2. Ztráta chemickým nedopalem

V okamžiku, kdy se spaliny odvádí komínem ven do ovzduší, tak je na nich vázané nejen zbytkové teplo, ale i energie, která je chemicky vázaná ve spalinách – plynný nedopal. Jejimi hlavními prvky jsou oxid uhelnatý CO, vodík H<sub>2</sub>, metan CH<sub>4</sub> a další uhlovodíkové látky. Největší zastoupení zde má oxid uhelnatý. Pokud by ve spalovací komoře docházelo k dokonalému spalování, všechny vzniklé oxid uhelnatý po vyhoření uhlíku v palivu dohoří na oxid uhličitý a následně uvolní další množství tepelné energie. Tento typ ztráty se dá vyjádřit i matematicky jako poměr tepelného obsahu hořlavých složek k výhřevnosti paliva [20]:

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot CO_{mg} \cdot O_{minSS}}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_i^r} \quad [-] \quad (5)$$

Při spalování biomasy nebo dendromasy ztráta nabývá zpravidla větších hodnot než při spalování uhlí, jelikož mají nižší výhřevnost než látky s vyšším obsahem uhlíku. [19] [21]

### 3.2.2.3. Ztráta mechanickým nedopalem

Ztráta mechanickým nedopalem se definuje jako množství nevyhořelého uhlíku, který se po vyhoření paliva objevuje v popelu nebo v sazích – mechanický nedopal. Množství této ztráty záleží na druhu paliva. Pokud se jedná o kotel na biomasu, tak ze samotné biomasy vzniká relativně zanedbatelné množství popela. Většinou se hodnota pohybuje okolo 1 %. Pokud je uhlí spalováno, množství nedopalu vzroste až na hodnotu v rozsahu od 2 do 5 %. Pro celkový mechanický nedopal platí vztah [20]:

$$Z_c = Z_{cš} + Z_{cp} + Z_{cu} + Z_{cr} \quad [\%] \quad (6)$$

Poté se jednotlivé ztráty vypočítají dle vztahu [20]:

$$Z_{ci} = \frac{Q_{ci}}{Q_i^r} \cdot A_r \cdot \left( \frac{C_i}{1 - C_i} \right) \cdot X_i \quad [-] \quad (7)$$

Zvýšení ztráty může vzniknout špatným dávkováním paliva do samotného kotle. [19] [21]

#### **3.2.2.4. Ztráta sdílením tepla do okolí**

Nastává tehdy, když teplota okolí je nižší než teplota plochy kotle. Za tohoto stavu kotel odevzdá část tepla do okolí. Proto, aby byla ztráta energie minimalizována, je nutné provést konstrukční úpravy kotle – vhodný materiál, izolace, tloušťka stěn.

#### **3.2.2.5. Ztráta fyzickým nedopalem**

Tento typ ztráty má podobný význam i vztah jako ztráta mechanickým nedopalem. Vyjádří se pomocí vztahu [20]:

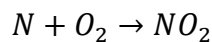
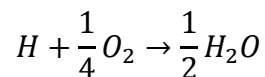
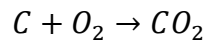
$$Z_f = \sum_i \frac{X_i}{1 - C_i} \cdot \frac{A_r}{Q_i} \cdot c_i \cdot t_i \quad [-] \quad (8)$$

### **3.3. Úspora energie**

Pro standardní domácí kotle na biomasu obvykle platí, že pomocí dřevěného paliva je voda ohřívána a je používána k vytápění. Následně studená voda opustí dům, vrací se zpátky do kotle a uzavře tím topný cyklus. Problém spočívá v tom, že horké spaliny, jenž obsahují značnou část tepla, odchází do atmosféry a vznikají tím teplotní ztráty. Obecně platí, že kotle díky těmto ztrátám mohou ztratit až 20 % vyprodukované energie. Motivací je tyto ztráty využít k redukci úniku energie, zachycení nebezpečných částic a zvýšení účinnosti celého systému. [22]

### 3.3.1. Spaliny

K určení entalpie komínových spalin je nutné znát celkové složení paliva, které je spalováno. Dřevo se skládá z největší části z uhlíku C, kyslíku O<sub>2</sub>, vodíku H<sub>2</sub> a dusíku N<sub>2</sub>. Navíc obsahuje další minerální látky a popel. Při spalování dřeva dochází k oxidaci s hlavními prvky a vzniknou následující reakce:

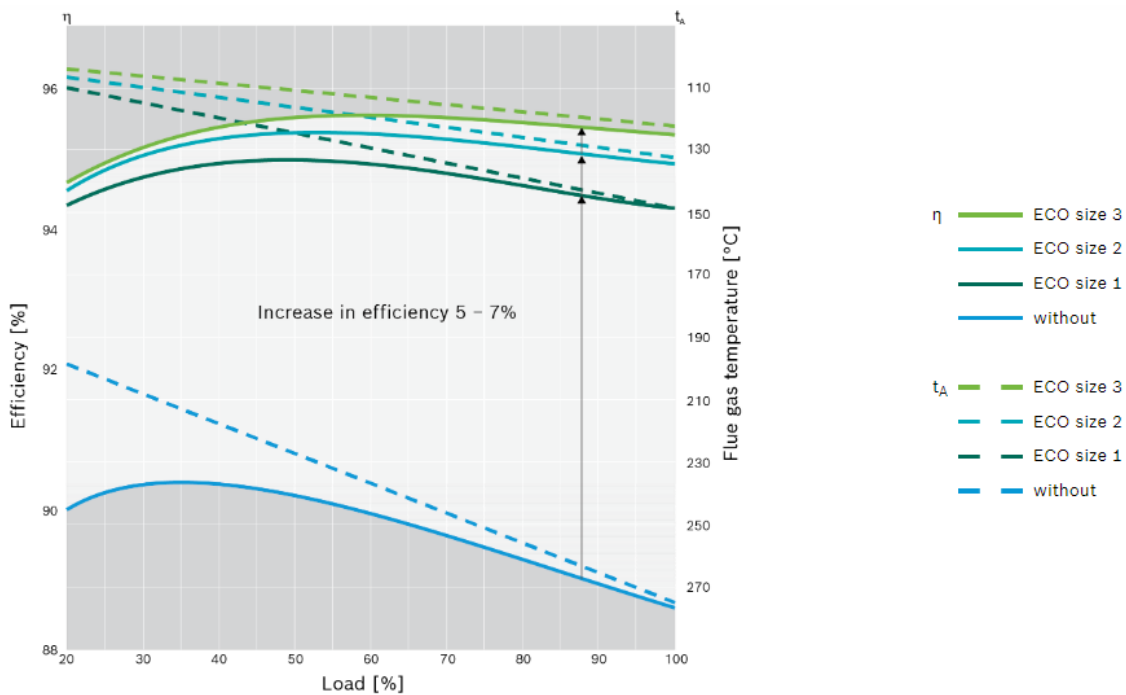


Z oxidace se můžou objevit i jiné sloučeniny, ale v praxi tyto hlavní produkty převažují nad ostatními, a tudíž jsou zanedbatelné. Z běžných kotlů jsou do atmosféry vypouštěny spaliny o průměrné teplotě 240 °C, které tvoří hlavní část teplotních ztrát. Velká část entalpie může být využita k predehřátí vody pomocí kondenzačního výměníku tepla. [22]

### 3.3.2. Kondenzátory

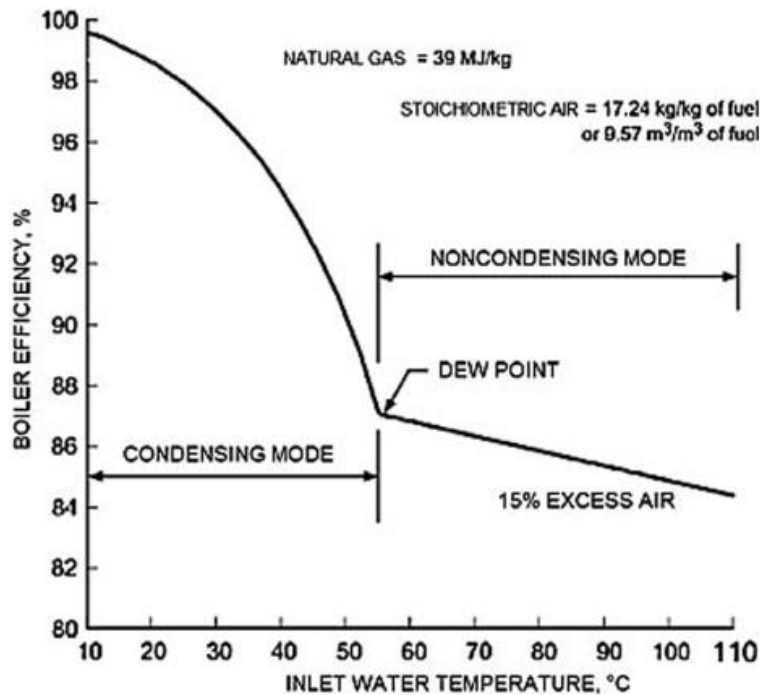
Dnes existuje mnoho různých druhů výměníku tepla. Používají se v mnoha odvětvích průmyslu s různými funkcemi, geometrií a rozměry. Vždy ale mají stejný záměr, a to přenést maximální množství tepla z jedné tekutiny do druhé. Dnes existují takové typy výměníku, které ke své funkci používají kondenzaci. Jedná se o tzv. kondenzační výměníky tepla, jejichž cílem je ochlazovat látky plynného stavu pomocí chladicího média. Ochlazování probíhá ve většině případech pomocí vody, která má teplotu výrazně menší, než je teplota rosného bodu spalin. Jakmile dojde ke kondenzaci, zkapalněná voda spolu s nežádoucími částicemi se hromadí v usazovací nádrži a uvolněné teplo se odvádí do topného systému, kde ohřívá vodu. Spaliny, které vyprodukuje dřevo jsou především tvořeny molekulami NO<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> a dalšími nekondenzovatelnými plyny. Aby se zabránilo korozi z kyselého kondenzátu, používají se materiály jako je nerezová ocel, sklolaminát nebo exponované povrchy potahující materiálem odolným vůči korozi. [23] [22]

Lze říci, že při každém ochlazení spalin zhruba o 20 °C se nám účinnost kotle se zvýší o 1 procentní bod. V grafu (viz Obrázek 8) se vyskytují dva průběhy, které jsou závislé na zatížení kotle. Plné křivky reprezentují účinnosti a přerušované teploty spalin. Spodní plná křivka nám ukazuje průběh kotle bez připojeného výměníku. Vrchní 3 plné křivky patří kotlům s různými typy kondenzátorů. Z grafu je možné vidět, že po připojení těchto zařízení lze zvýšit celkovou účinnost kotle až o 10 % a celkovou účinnost tak navýšit až na 95 %. [23] [25]



*Obrázek 8 - Nárůst účinnosti za pomoci různých typů připojených kondenzátorů [24]*

K získání maximálního množství tepelné energie ze spalin se využívá latentní teplo. Pro získání latentního tepla spalin je třeba použít chladicí kapalinu o teplotě výrazně nižší, než je teplota rosného bodu. Pokud se spaliny ochladí pod teplotu rosného bodu, vytvoří se na povrchu trubky kondenzát, který se následně seskupuje ve skladovací nádrži. Vodní pára vzniká v důsledku spalovací reakce kyslíku ze vzduchu a vodíku ze dřeva. Tudíž množství uvolněného latentního tepla a množství vzniklé vodní páry při spalování závisí na vlhkosti a složení dřevního paliva. [23]



Obrázek 9 - Vliv kondenzace na účinnost kotle [23]

Pro kondenzační kotle rozdělujeme 2 různé typy výměníku tepla. První varianta využívá nepřímé kondenzace bez rozstřikování vody a druhá využívá přímý kontakt studené vody s horkými spalinami za pomoci trysek, dokud není dosažena hodnota rosného bodu [22].

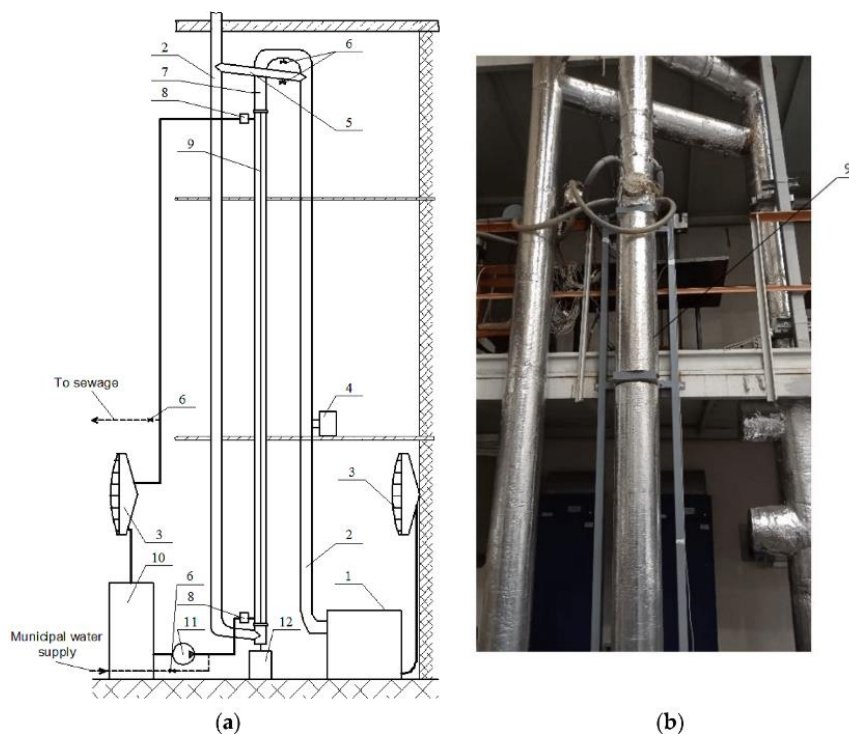
### 3.3.2.1. Kondenzátor spalin bez přímého vstřikování vody

Nepřímý kondenzátor je nejběžnější typ výměníku tepla, které dnes známe. Dvě tekutiny jsou vedeny ve 2 oddělených trubcích, přes které je vedeno teplo. V jedné z nich proudí horké spaliny a ve druhé chladicí médium, nejčastěji voda. Vzniklý kondenzát se skladuje ve spodní části výměníku a je následně odváděn kanalizací ven ze systému.

Rozděluje se na 3 různé typy:

- Paralelní proudění – spaliny a chladicí médium proudí ve stejném směru.
- Protichůdné proudění – spaliny a chladicí médium proudí v opačném směru.
- Křížové proudění – spaliny a chladicí médium proudí v kolmých směrech. [22] [25]

Na Obrázku 10 je popsán výměník, který používá protichůdné proudění. Skládá se z dlouhých trubek s malým průměrem, které jsou vedeny přímo z kotle a proudí v nich spaliny. Kolem těchto trubek proudí chladicí kapalina, která odebírá teplo ze spalin. Kondenzát, který vzniká na vnitřní straně kalorimetrické trubice, je odváděn do sběrné nádrže. [26]



*Obrázek 10 - Schéma zapojení (a), Celkový pohled na vertikální kondenzátor spalin [26]*

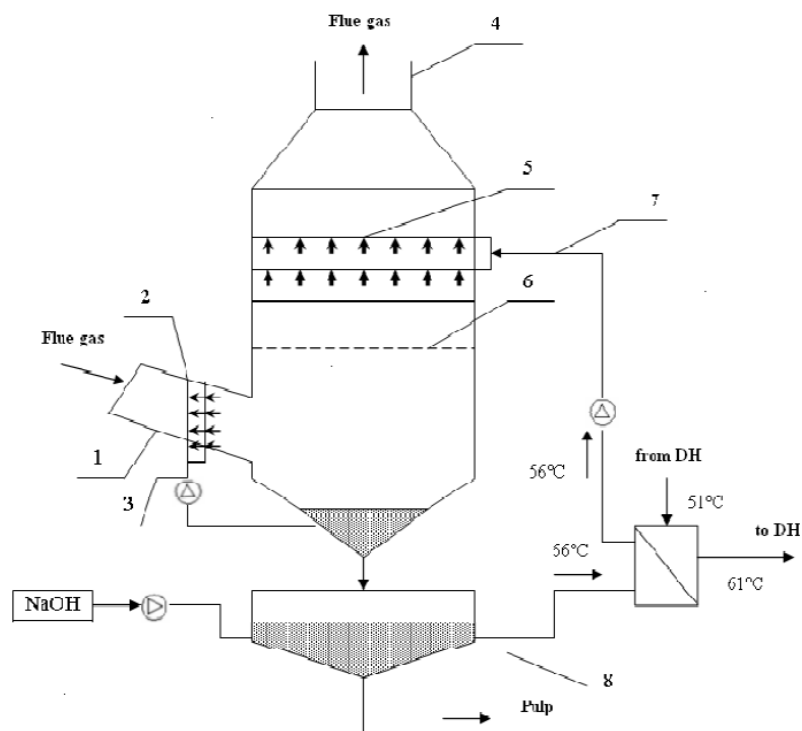
(1) kotel, (2) komín, (3) vzduchem chlazený výměník tepla, (4) odtah spalin, (5) obtoková trubice, (6) ventil, (7) vstup proudících spalin – místo měření teploty a vlhkosti, (8) směšovač vody, (9) kalorimetrická vertikální trubice, (10) nádrž s vodou, (11) vodní čerpadlo, (12) sběrná nádrž kondenzátu.



### 3.3.2.2. Kondenzátor spalin s přímým vstřikováním vody

V tomto typu výměníku dochází k získávání tepla pomocí přímého kontaktu studené vody a horkých spalin. Dochází k rozstřikování chladicího média do horkého plynu v rekuperační jednotce, aby se spaliny ochladily pod teplotu rosného bodu.

Kondenzátor se dělí na dvě části, z nichž každá z nich má svou specifickou funkci. V první části jsou přiváděny spaliny, které jsou ochlazovány vodou ze spodní části rekuperačního zařízení pomocí trysek. To má za příčinu zvýšení vlhkosti spalin a snížení jejich teploty, aby podpořila lepší kondenzaci ve druhé části výměníku. Zvlhčené a předchladené spaliny vstupují do druhé části rekuperačního zařízení. Plyn se pohybuje ze spodní části směrem nahoru a společně seshora pomocí trysek vystřikuje voda. Ve druhé části už probíhá prudké ochlazení a samotná kondenzace. Vystřikovaná voda už dosahuje nižších hodnot, než je teplota rosného bodu a přivádí se z dolní nádrže. Princip rekuperace tepla je zobrazen na Obrázku 11. [25]



Obrázek 11 - Rekuperační zařízení a princip jeho zapojení [25]

(1) Klapky bez těsnění, (2) a (5) Rozprašovací trysky, (3) a (7) Přívod vody pro rozprašovací trysky, (4) Komín, (6) Klapky s těsněním, (8) Přívod vody do výměníku tepla sítě dálkového vytápění

Užité teplo získané kondenzací je předáno vodě do tepelného výměníku sítě. K odstranění nežádoucích látek, které se kondenzací uvolnily ze spalin, slouží usazovací nádrž, ve které během celého procesu stoupá hladina kyselé vody. Pomocí hydroxidu sodného dochází k neutralizaci vody, čímž se zároveň odstraňují tvrdé nežádoucí částice. [25]

## 4. Výpočet celkové účinnosti kotle

Tato kapitola je věnovaná účinnosti samotného kotle bez zapojeného výměníku. Nejdříve jsou vypočteny tepelné ztráty a následně je z nich zjištěna celková účinnost kotle. V této práci je vycházeno z rozboru paliva, které bylo zadáno. Je uvažovaná listnatá dřevní štěpka, která nebyla nijak upravovaná. Na základě konzultace s vedoucím mé bakalářské práce byl zvolen kotel o výkonu  $Q_v = 8\,000\text{ kW} = 8\text{ MW}$ .

*Tabulka 6 – Zadané složení paliva*

<b>W<sup>r</sup></b>	0,4335
<b>A<sup>d</sup></b>	0,016159
<b>C<sup>daf</sup></b>	0,50959
<b>H<sup>daf</sup></b>	0,069334
<b>N<sup>daf</sup></b>	0,002646
<b>S<sup>daf</sup></b>	0,000033
<b>O<sup>daf</sup></b>	0,418397
<b>Q<sub>s</sub><sup>daf</sup></b>	19 769 kJ/kg

Pro jednotlivé prvky se používají indexy, které definují různé stavy paliva. Nejčastěji se používají 3 typy:

- Stav bez vody a popela – daf (dry – ashfree).
- Stav pouze bez vody – d (dry).
- Stav původní zahrnující vodu, popelovinu a hořlavinu – r (real).

Pro stechiometrické výpočty budou využity prvky v původním stavu, což znamená, že jednotlivé hodnoty je nutné přepočítat.

## 4.1. Přepočet paliva

Pro stav dry platí vztah:

$$P_d = P_{daf} \cdot (1 - A_d) \quad (9)$$

Kde  $P_d$  je vyjadřovaný prvek paliva

Pro stav real platí:

$$P_r = P_d \cdot (1 - W_r) \quad (10)$$

Výpočet provedu pro jednotlivé prvky.

*Tabulka 7 – Přepočtené jednotlivé prvky paliva*

	<b>Raw</b>	<b>Dry</b>	<b>Dry ashfree</b>
<b>C</b>	0,284018	0,501356	0,50959
<b>H</b>	0,038643	0,068214	0,069334
<b>N</b>	0,0014745	0,002603	0,002646
<b>S</b>	0,00001841	0,00003253	0,000033
<b>O</b>	0,233192	0,411636	0,418397
<b>A</b>	0,009154	0,016159	-
<b>W</b>	0,4335	-	-

Totéž platí pro spalné teplo. Ve většině případů se celková účinnost kotle počítá s výhřevností paliva v původním stavu  $Q_i^r$ , která lze vyjádřit ze zadaného spalného tepla  $Q_s^{daf}$ . Pro přepočet výhřevnosti paliva platí tyto vztahy:

$$Q_s^r = Q_s^{daf} \cdot (1 - W_r - A_r) \quad [kJ/kg] \quad (11)$$

$$Q_i^r = Q_s^r - 2453 \cdot (W_r + 9 \cdot H_r) \quad [kJ/kg] \quad (12)$$

Vychází tyto hodnoty:

*Tabulka 8 – Hodnoty výhřevnosti a spalného tepla*

$Q_s^{daf}$	19 769 kJ/kg
$Q_s^r$	11 018,2 kJ/kg
$Q_i^r$	9100,89 kJ/kg

## 4.2. Stechiometrie spalování

Pro stechiometrické výpočty obvykle platí to, že se jednotlivé vypočtené objemové složky vztahují na hmotnostní podíl, a tudíž se vyjadřují v  $Nm^3$  (normální metr krychlový pro  $T_n = 273$  K a  $p_n = 101\,325$  Pa) na 1 kg spáleného paliva pro suchý nebo vlhký stav. Vzorce pro stechiometrický výpočet jsou brány ze skript [20].

Nejprve je nutné vypočítat, kolik minimálního množství vzduchu je potřeba k dokonalému spálení 1 kg paliva.

$$O_{O_2min} = 22,39 * \left( \frac{C_r}{12,01} + \frac{H_r}{4,032} + \frac{S_r}{32,06} - \frac{O_r}{32} \right) \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (13)$$

$$O_{O_2min} = \mathbf{0,583} \quad Nm^3/kg_{pal} \quad (14)$$

Následně lze určit minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva.

$$O_{minVS} = \frac{O_{O_2min}}{0,21} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (15)$$

$$O_{minVS} = \mathbf{2,774} \quad Nm^3/kg_{pal} \quad (16)$$

Hodnota 0,21 značí podíl kyslíku ve vzduchu.

Pro zjištění minimálního objemu vlhkého vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva, je potřeba předešlou vypočítanou hodnotu vynásobit součinitelem  $\kappa_v$ , který reprezentuje podíl vodní páry na 1 Nm<sup>3</sup> suchého vzduchu. Tento součinitel je možno získat ze vztahu:

$$\kappa_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad [-] \quad (17)$$

Kde  $\varphi$  [%] je relativní vlhkost vzduchu,  $p''$  [MPa] je parciální tlak syté vodní páry pro danou teplotu a  $p_c$  [MPa] je celkový tlak.

Jelikož většinu hodnot nelze určit, tak v této práci je používaná hodnota součinitele pro běžné klimatické podmínky v ČR, která většinou bývá  $\kappa_v = 1,016$ . Tudíž nyní lze určit minimální objem vlhkého vzduchu, který je definovaný vztahem:

$$O_{minVV} = \kappa_v * O_{minSV} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (18)$$

$$O_{minVV} = \mathbf{2,819} \quad Nm^3/kg_{pal} \quad (19)$$

Momentálně je možné vypočítat objem vodní páry, který je pouze rozdíl obou dříve zjištěných objemů.

$$O_{H_2O}^V = O_{minVV} - O_{minSV} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (20)$$

$$O_{H_2O}^V = \mathbf{0,0444} \quad Nm^3/kg_{pal} \quad (21)$$

Když už jsou známy hodnoty minimálního suchého vzduchu a hodnoty všech složek paliva v původním stavu, lze určit jednotlivé objemové složky spalin.

Pro objem CO<sub>2</sub> ve spalinách platí:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C_r + 0,0003 \cdot O_{minVS} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (22)$$

$$O_{CO_2} = \mathbf{0,527} \quad Nm^3/kg_{pal} \quad (23)$$

Pro objem SO<sub>2</sub> ve spalínách platí:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S_r \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (24)$$

$$O_{SO_2} = \mathbf{0,0000126 Nm^3/kg_{pal}} \quad (25)$$

Pro objem N<sub>2</sub> ve spalínách platí:

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N_r + 0,7805 \cdot O_{minVS} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (26)$$

$$O_{N_2} = \mathbf{2,167 Nm^3/kg_{pal}} \quad (27)$$

Pro objem argonu ve spalínách spolu i s dalšími vzácnými plyny platí:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{minVS} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (28)$$

$$O_{Ar} = \mathbf{0,0255 Nm^3/kg_{pal}} \quad (29)$$

Z jednotlivých objemů složek spalín lze zjistit minimální objem suchých spalín, který je získán součtem jednotlivých složek spalín:

$$O_{minSS} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (30)$$

$$O_{minSS} = \mathbf{2,719 Nm^3/kg_{pal}} \quad (31)$$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalín lze určit z hodnoty vodíku v původním stavu, vlhkosti paliva a objemu vodní páry.

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H_r + x \frac{22,4}{18,016} \cdot W_r + O_{H_2O}^V \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (32)$$

$$O_{H_2O}^S = \mathbf{1,013 Nm^3/kg_{pal}} \quad (33)$$

Nyní je možné vypočítat minimální objem vlhkých spalin, který lze získat pouze součtem objemu vodní páry ve vlhkých spalinách s minimálním objemem suchých spalin.

$$O_{minSV} = O_{SSmin} + O_{H_2O}^S \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (34)$$

$$O_{minSV} = \mathbf{3,732} \quad Nm^3/kg_{pal} \quad (35)$$

Pro určení velikosti objemu spalin z 1 kg paliva, je potřeba znát součinitel přebytku spalovacího vzduchu. Dá se určit jednoduchým vztahem:

$$\alpha = \frac{O_{VV}}{O_{minVV}} \quad [-] \quad (36)$$

Kde  $O_{VV}$  je skutečné množství spalovacího vlhkého vzduchu. Součinitel přebytku vzduchu po konzultaci s vedoucím mé práce byl zvolen na hodnotu  $\alpha = 1,5$ . Tudíž nyní je možné určit objem vlhkých spalin z 1 kg spalovaného paliva.

$$O_{SV} = O_{minVS} + (\alpha - 1) \cdot O_{minVV} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (37)$$

$$O_{SV} = \mathbf{5,141} \quad Nm^3/kg_{pal} \quad (38)$$

Podobným způsobem lze určit i objem suchých spalin. Platí vztah:

$$O_{SS} = O_{minSS} + (\alpha - 1) \cdot O_{minVS} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (39)$$

$$O_{SS} = \mathbf{4,106} \quad Nm^3/kg_{pal} \quad (40)$$

### 4.3. Entalpie spalin

Pro výpočet odběru tepla nebo účinnosti celého topného systému je lepší využívat hodnoty entalpií spalin než jejich měrné tepelné kapacity. Důvod je takový, že hodnota měrné tepelné kapacity se s měnící teplotou výrazně mění, což by výpočet zkomplikovalo, a tudíž je jednodušší využívat entalpii. Jelikož jsou známy z předešlých výpočtů všechny hodnoty složek spalin, lze určit entalpii spalin při dané teplotě  $t$  [°C] a daném přebytku spalovacího vzduchu  $\alpha$ :

$$I_S^{t,\alpha} = I_{mins}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{minV}^t \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (41)$$

Kde  $I_{mins}$  je entalpie stechiometrických spalin a  $I_{minV}$  je entalpie při minimálního množství vzduchu. Pro výpočet obou složek platí tyto vztahy:

$$I_{mins}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + a_u \cdot A_r \cdot i_{pop} \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (42)$$

$$I_{minV}^t = V_{minSV} \cdot i_{SV} + V_{VP} \cdot i_{H_2O} \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (43)$$

Kde  $i_{CO_2}, i_{SO_2}, i_{N_2}, i_{Ar}, i_{pop}, i_{SV}, i_{H_2O}$  [kJ/Nm<sup>3</sup>] jsou měrné entalpie příslušné složky při konkrétní teplotě  $t$  [°C] a  $a_u$  [-] je poměrné zastoupení popela v úletu z ohniště, kterou jsem zvolil 0,5.

Příslušné hodnoty měrných entalpií složek jsem získal z tabulky 4-6 ze skript [20].

**Tabulka 9** – měrné entalpie složek spalin [20]

t [°C]	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub> O	popílek	SV
0	0	0	0	0	0	0	0
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,1	20,2	32,57
100	170	191,2	129,5	93,07	132,3	80,4	132,3
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	170	266,2
300	558,9	610,4	392,1	278,8	462,8	264,6	402,5

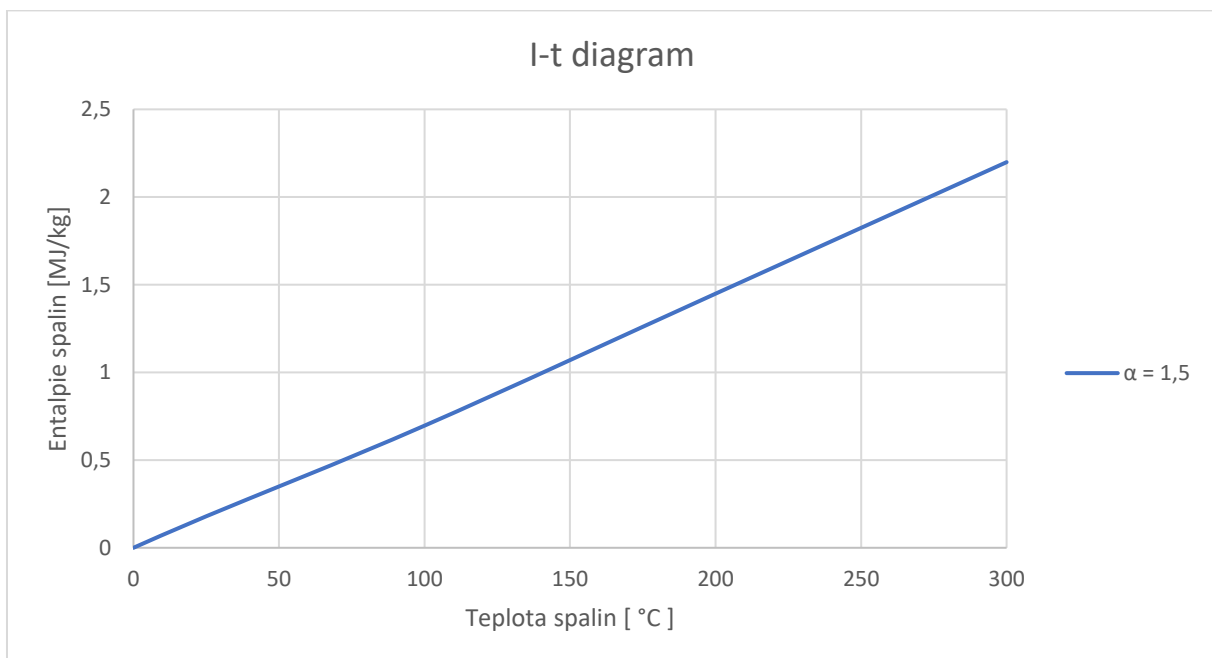


Výsledky entalpií jsou vypsány v Tabulce 10.

*Tabulka 10 – entalpie spalin pro určení účinnosti kotle*

	<b>100 °C</b>
$I_{mins}^{100}$ [kJ/kg <sub>pal</sub> ]	509,86
$I_{minV}^{100}$ [kJ/kg <sub>pal</sub> ]	372,91
$I_S^{100}$ [kJ/kg <sub>pal</sub> ]	696,31

Pro přesnější určení entalpie spalin je sestrojena závislost, jejíž postup je popsán ve skriptu [20], kapitola 4.2.5.



*Obrázek 12 - Entalpie spalin*

## 4.4. Účinnost kotle

Pro výpočet účinnosti je použita tzv. nepřímá metoda. Z toho vyplývá, že je potřeba si určit jednotlivé tepelné ztráty. Veškeré vzorce jsou opět brány ze skript [20].

### 4.4.1. Ztráta mechanickým nedopalem

Pro tento typ ztráty se uvažují pouze ztrátu ve škváře, v úletu a v propadu. Platí tento vztah:

$$Z_c = \frac{Q_{ci}}{Q_i^r} \cdot A_r \cdot \left( \frac{C_i}{1 - C_i} \right) \cdot X_i \quad [-] \quad (44)$$

Kde  $C_i$  [-] je podíl hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků,  $X_i$  [-] je podíl popela z celkového množství v palivu  $A_r$ ,  $Q_{ci}$  [kJ/kg] je výhřevnost hořlaviny. Jednotlivé hodnoty jsou voleny na základě dohody s vedoucím mé bakalářské práce a vypsány v Tabulce 11:

*Tabulka 11 – Hodnoty jednotlivých ztrát*

	škvára	úlet	propad
$C_i$	0,1	0,1	0,1
$X_i$	0,45	0,45	0,1
$Q_{ci}$	32 600	32 600	32 600

Následně je proveden výpočet:

$$Z_c = \frac{Q_{ci}}{Q_i^r} \cdot A_r \cdot \left( \frac{C_s \cdot X_s}{1 - C_s} + \frac{C_u \cdot X_u}{1 - C_u} + \frac{C_p \cdot X_p}{1 - C_p} \right) \quad [-] \quad (45)$$

$$Z_c = 0,00346117 = \mathbf{0,346 \%} \quad (46)$$

### 4.4.2. Ztráta chemickým nedopalem

Pro ztrátu chemickým nedopalem platí vztah:

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot CO_{mg} \cdot O_{minSS}}{(21 - O_{2ref}) \cdot Q_i^r} \quad [-] \quad (47)$$

Kde  $CO_{mg}$  [mg/Nm<sup>3</sup>] je koncentrace CO ve spalinách a  $O_{2ref}$  je obsah kyslíku pro referenční stav spalin. Hodnotu koncentrace volím dle emisního limitu  $CO_{mg} = 250 \text{ mg/m}^3$  a obsah kyslíku pro dřevo platí  $O_{2ref} = 0,11$ .

Po dosazení vychází:

$$Z_{CO} = 0,00158 = \mathbf{0,158\%} \quad (48)$$

#### 4.4.3. Ztráta sdílením tepla do okolí

Tato hodnota říká, jaké množství tepla uniká pláštěm kotle do okolí. Ta je zvolena podle výkonu kotle, který je na začátku výpočtů zvolen:

$$Z_{sv} = 0,02 = \mathbf{2\%} \quad (49)$$

#### 4.4.4. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Významově je velmi podobná jako ztráta mechanickým nedopalem. Opět je zde zahrnuta ztráta ve škváře, v úletu a v propadu. Platí vztah:

$$Z_f = \frac{c_s \cdot t_s}{Q_i} \cdot A_r \cdot \left( \frac{X_s}{1 - C_s} + \frac{X_u}{1 - C_u} + \frac{X_p}{1 - C_p} \right) \quad [-] \quad (50)$$

Kde  $c_s$  [kJ/kg.K] je měrná tepelná kapacita tuhých zbytků a  $t_s$  [°C] je teplota uvažovaného druhu tuhých zbytků. Teplotu tuhého zbytku si volím  $t = 600$  °C a z této hodnoty odečítám hodnotu měrné tepelné kapacity  $c_s = 0,93$  kJ/kg · K

$$Z_f = 5,825 \cdot 10^{-4} = \mathbf{0,0583\%} \quad (51)$$

#### 4.4.5. Komínová ztráta

Tento typ nejvíce ovlivňuje celkovou účinnost kotle. Platí tento vztah:

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_S^{t_k, \alpha} - I_S^{t_{vz}, \alpha}}{Q_i^r} \quad [-] \quad (52)$$

Kde  $I_S^{t_k, \alpha}$  je entalpie spalin za kotlem a  $I_S^{t_{vz}, \alpha}$  je entalpie spalin při teplotě vzduchu  $t = 25$  °C. Teplota spalin za kotlem je po diskusi s vedoucím mé práce zvolena na hodnotu  $t = 150$  °C. Pro obě teploty jsou odečteny hodnoty entalpií z I-t digramu.

$$I_S^{150, \alpha} = \mathbf{1058,2} \text{ kJ/kg}_{pal} \quad (53)$$

$$I_S^{25, \alpha} = \mathbf{179,62} \text{ kJ/kg}_{pal} \quad (54)$$

Po dosazení do vztahu vychází hodnota komínové ztráty:

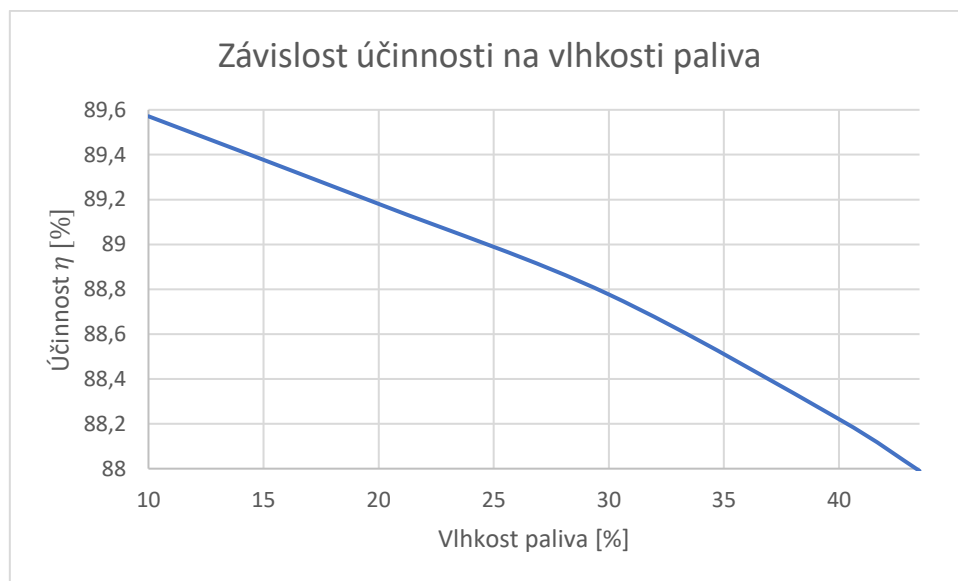
$$Z_k = 0,13891 = \mathbf{9,62\%} \quad (55)$$

Jelikož všechny hodnoty tepelných ztrát už jsou známy, je možné provést výpočet celkové účinnosti:

$$\eta_k = 1 - Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_f - Z_k \quad [-] \quad (56)$$

$$\eta_k = 0,8804 = \mathbf{88,04\%} \quad (57)$$

Následně byly provedeny výpočty účinností pro různé vlhkosti paliva. Na obrázku 13 je znázorněna závislost hodnot účinností na různých vlhkostech paliva. Je z ní patrné, že při spalování biomasy, která má nižší vlhkost, dosahuje kotel vyšší účinnosti. Nízké vlhkosti se dá dosáhnout například sušením.



*Obrázek 13 - Závislost účinnosti na vlhkosti paliva*

## 5. Výpočet tepelného přínosu kondenzací spalin

Zpětné získání tepla lze dosáhnout tím, že se spaliny ochladí na jejich teplotu rosného bodu. Ochlazení pod tuto hodnotu zapříčiní to, že spolu s citelným teplem se uvolní i latentní teplo ze spalin, které má výrazný vliv na celkové množství uvolněného tepla. Teplota rosného bodu ale není pro všechny paliva stejná. Záleží na spoustě faktorech s tím, že jeden z těch nejdůležitějších je vlhkost paliva. Množství vody v palivu totiž výrazně ovlivňuje množství

zkondenzované vody i získaného tepla ze spalin. V první řadě je nutné se určit teplotu rosného bodu zadaného paliva.

## 5.1. Teplota rosného bodu

Kondenzace nastane tehdy, když se vodní pára pohybuje na mezi sytosti. Jelikož zadaná biomasa obsahuje minimální množství síry, lze jí zanedbat a počítat pouze s vodní párou obsažené ve spalinách. Tudíž je potřeba získat parciální tlak vodní páry ve spalinách. Platí vztah:

$$\frac{p_{H_2O}}{p_c} = \frac{O_{H_2O}}{O_{VS}} \quad (58)$$

$$p_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{VS}} \cdot p_c \quad [kPa] \quad (59)$$

Kde  $O_{H_2O}$  je objem vodní páry ve spalinách a  $p_c$  je celkový tlak spalin, který volím jako atmosférický tlak  $p_c = 101,325 \text{ kPa}$ .

Objem vodní páry ve spalinách lze určit ze stechiometrických výpočtů pomocí vztahu:

$$O_{H_2O} = O_{H_2O}^S + (\nu_V - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{minSV} \quad [Nm^3/kg_{pal}] \quad (60)$$

$$O_{H_2O} = \mathbf{1,035} \text{ Nm}^3/kg_{pal} \quad (61)$$

Po určení objemu vodní páry ve spalinách lze vypočítat parciální tlak vodní páry:

$$p_{H_2O} = \mathbf{20,13} \text{ kPa} \quad (62)$$

Hodnotu teploty rosného bodu lze odečíst z tabulek sytosti vodní páry:

$$t_{RB} = \mathbf{60,5} \text{ }^\circ\text{C} \quad (63)$$

## 5.2. Ochlazování spalin

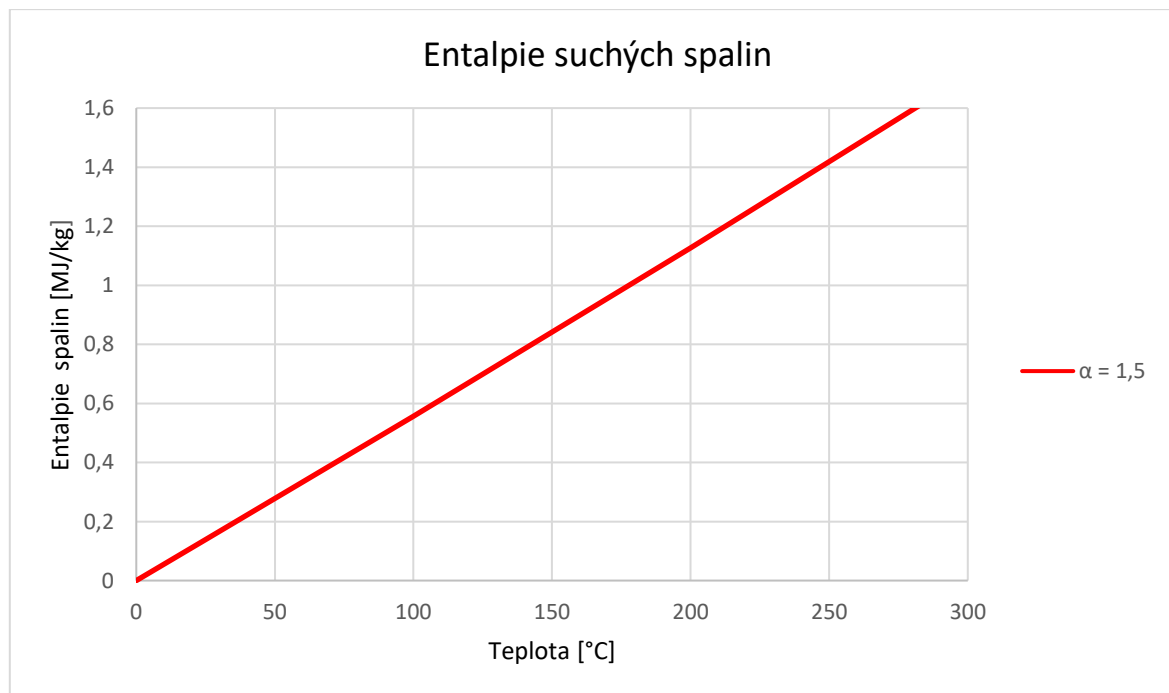
Po diskusi s vedoucím mé práce je zvolena pevná hodnota teploty spalin vstupující do výměníku  $t_{vst} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ . To samé platí pro spaliny na výstupu. Po ochlazení mají spaliny na výstupu z kondenzátoru okolo  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jelikož při ochlazování pod teplotu rosného bodu dojde k úbytku vodní páry, rozdělím spaliny na 2 složky: suché spaliny a vodní páru. Pro určení entalpie suchých spalin je použita stejná metodika jako při určování účinnosti kotle s tím rozdílem, že do výpočtu entalpie suchých spalin není zahrnuta měrná entalpie vody, ale jen suché složky. [27] [28]

$$I_{SSmin}^t = O_{CO2} \cdot i_{CO2} + O_{SO2} \cdot i_{SO2} + O_{N2} \cdot i_{N2} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} + a_{\dot{u}} \cdot A_r \cdot i_{pop} \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (64)$$

$$I_{Vmin}^t = O_{minSV} \cdot i_{VS} \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (65)$$

$$I_{SS_{m\acute{e}r}}^t = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (66)$$

Pro lepší určení hodnot entalpií suchých spalin je opět vytvořena závislost.



Obrázek 14 - Entalpie suchých spalin

..

Nyní je potřeba z hodnoty entalpie suchých spalin určit objemovou hodnotu. Objemová entalpie suchých spalin se určí pomocí vztahu:

$$I_{SS\_obj}^t = \frac{I_{SS\_měr}^t}{O_{SS}} \quad [kJ/Nm^3_{SS}] \quad (67)$$

To samé platí tudíž i pro entalpii vodní páry:

$$I_{v\_obj}^t = I_{v\_měr}^t \cdot \rho_v = I_{v\_měr}^t \cdot \frac{M_v}{V_m} \quad [kJ/Nm^3_v] \quad (68)$$

Kde  $M_v = 18,02$  [kg/kmol] je molární hmotnost vody,  $V_m = 22,41$  [Nm<sup>3</sup>/kmol] je molární objem vody (při tlaku 101 325 Pa a teplotě 273,15 K) a  $I_{v\_měr}^t$  je hodnota entalpie syté páry při konkrétní teplotě, která je odečtena z tabulek vlastností syté páry a kapaliny. Pro určení celkové objemové entalpie vlhkých spalin jsou použity předešlé vypočtené hodnoty s tím, že ke každé přidám objemovou koncentraci dané složky. Kvůli kondenzaci dojde po dosažení teploty rosného bodu k úbytku vodní páry, a to je nutné zohlednit i ve výpočtech. Tudíž platí vztah:

$$I_{SV\_obj}^t = I_{SS\_obj}^t \cdot x_{SS/SV} + I_{v\_obj}^t \cdot x_{v/SV} \quad [kJ/Nm^3_{SV}] \quad (69)$$

Kde  $x_{SS/SV}$  je objemový podíl suchých spalin ve vlhkých spalinách a  $x_{v/SV}$  je objemový podíl vodní páry ve vlhkých spalinách. Vynásobením objemové entalpie  $I_{SV\_obj}^t$  s objemem vlhkých spalin, vychází hodnota entalpie vlhkých spalin:

$$I_{SV}^t = I_{SV\_obj}^t \cdot O_{SV} \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (70)$$

Celkové získané teplo se vypočítá jako rozdíl entalpií vlhkých spalin na vstupu a výstupu z kondenzátoru. Je ale nutné brát v potaz, že při ochlazování ve výměníku pod teplotu rosného bodu se uvolňuje latentní teplo vodní páry a objemový podíl vodní páry ve spalinách se zmenšuje oproti stavu před vstupem do ochlazovacího systému. To znamená, že metodika pro výpočet entalpie, která byla použita v předešlých výpočtech pro bilancování a účinnost kotle, nelze pro tento případ použít, jelikož vodní pára ve spalinách byla brána jako nekondenzující plyn [27] [28].

Během kondenzace se vodní pára nachází v oblasti syté páry a s klesající teplotou spalin se zmenšuje i podíl vodní páry. Tím vzniká množství kondenzátu. Pro určení zkondenzované vodní páry platí tento vztah:

$$O_{kon} = O_{H_2O}^S - O_v \quad [Nm_v^3/kg_{pal}] \quad (71)$$

Kde  $O_v$  [ $Nm^3/kg_{pal}$ ] je objem vodní páry ve spalinách po kondenzaci. Lze ho určit pomocí vztahu:

$$O_v = \frac{O_{ss}}{\frac{p_c}{p_{H_2O_{kon}}} - 1} \quad [Nm_v^3/kg_{pal}] \quad (72)$$

Kde  $p_{H_2O_{kon}}$  [kPa] je parciální tlak vodní páry ve spalinách pro výstupní teplotu z kondenzátoru.

$$I_{kon_{obj}}^t = I_{kon_{měr}}^t \cdot \rho_v = I_{kon_{měr}}^t \cdot \frac{M_v}{V_m} \quad [kJ/Nm_v^3] \quad (73)$$

$$I_{kon}^t = I_{kon_{obj}}^t \cdot O_v \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (74)$$

Hodnoty pro spaliny na vstupu ( $t = 150$  °C) a výstupu ( $t = 55$  °C) jsou vyneseny v Tabulce 12.

*Tabulka 12 – Hodnoty určené pro výpočet získaného tepla z kondenzace*

	<b>150 °C</b>	<b>55 °C</b>
$I_{SS_{měr}}^t$ [kJ/kg <sub>pal</sub> ]	841,05	304,92
$I_{SS_{obj}}^t$ [kJ/Nm <sub>SS</sub> <sup>3</sup> ]	204,82	74,25
$I_{v_{měr}}^t$ [kJ/kg <sub>H2O</sub> ]	2776,9	2601,51
$I_{v_{obj}}^t$ [kJ/Nm <sub>v</sub> <sup>3</sup> ]	2230,44	2089,57
$I_{SV_{obj}}^t$ [kJ/Nm <sub>SV</sub> <sup>3</sup> ]	612,59	377,176
$I_{SV}^t$ [kJ/kg <sub>pal</sub> ]	3149,55	1939,2
$x_{SS/SV}$ [Nm <sub>SS</sub> <sup>3</sup> /Nm <sub>SV</sub> <sup>3</sup> ]	0,799	0,8497
$x_{v/SV}$ [Nm <sub>v</sub> <sup>3</sup> /Nm <sub>SV</sub> <sup>3</sup> ]	0,201	0,1503
$O_{kon}$ [Nm <sub>v</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub> ]	-	0,2568
$O_v$ [Nm <sub>v</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub> ]	-	0,756
$p_{H_2O_{kon}}$ [kPa]	-	12,351
$I_{kon_{měr}}^t$ [kJ/Nm <sub>kon</sub> <sup>3</sup> ]	-	230,225
$I_{kon}^t$ [kJ/kg <sub>pal</sub> ]	-	47,48



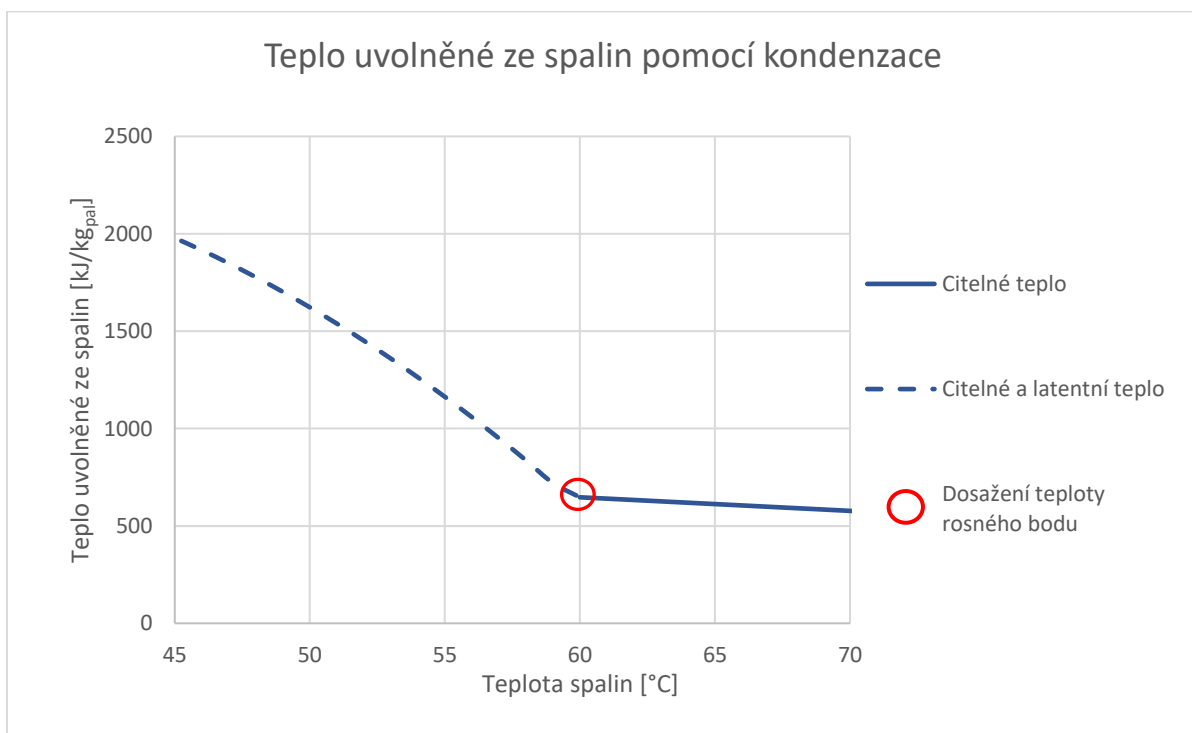
Následně je proveden výpočet pro získání tepla z kondenzace. Je určeno pomocí rozdílu entalpií vlhkých mezi vstupem a výstupem z kondenzátoru. K hodnotě entalpie na výstupu z kondenzátoru se musí ještě připočíst entalpie kondenzátu, kterou byla vypočtena v předešlých krocích [28].

$$Q_{kon} = I_{SV}^{150} - (I_{SV}^{55} + I_{kon}^{55}) \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (75)$$

$$Q_{kon} = 1132,197 \text{ kJ/kg}_{pal} \quad (76)$$

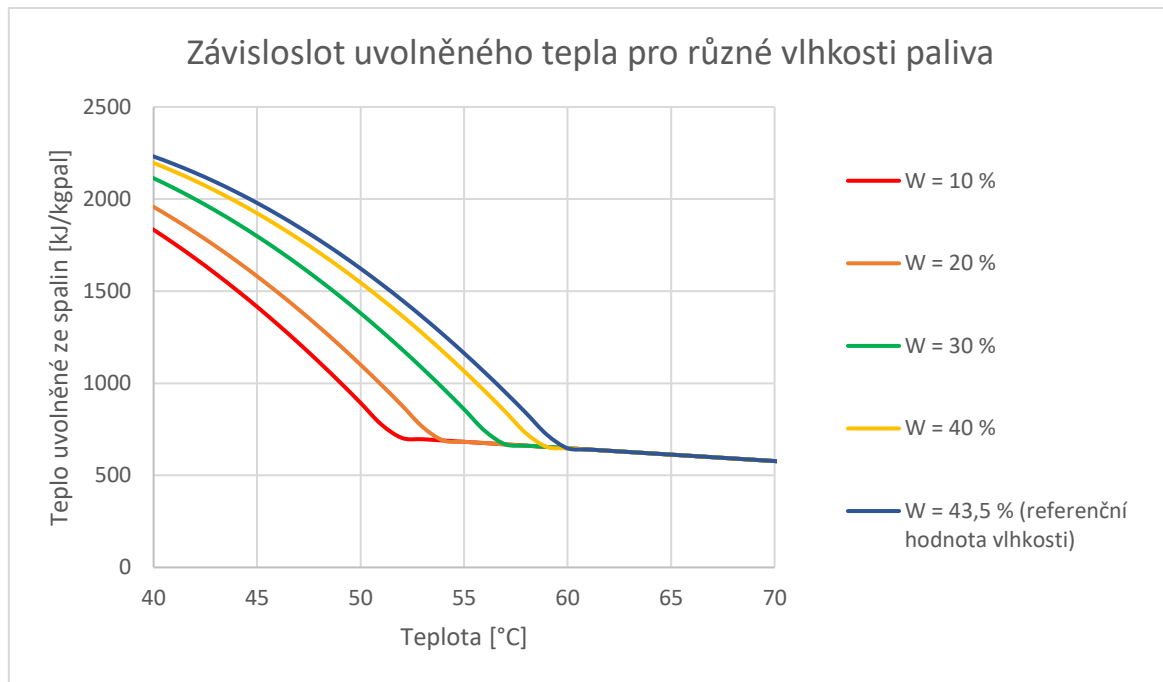
### 5.3. Závislost získaného tepla na teplotě spalin

Na obrázku 15 je znázorněn průběh získávání tepla pomocí ochlazování spalin. Je z něj patrné, že po dosažení teploty rosného bodu se uvolňuje daleko více tepla než při pouhém uvolňování citelného tepla.



Obrázek 15 - Teplu uvolněné ze spalin pomocí kondenzace

Na Obrázku 16 lze pozorovat průběhy, které představují uvolněné teplo pro různé vlhkosti paliv. Z grafu je zřejmé, že s měnící se vlhkostí paliva se mění i teplota rosného bodu. Příčina je taková, že při menších vlhkostech paliva je i menší objemový podíl vody ve spalinách a tím se zmenšuje parciální tlak vodní páry, což má zásadní vliv na hodnotu teploty rosného bodu.



Obrázek 16 - Uvolněné teplo pro různé typy paliv

## 5.4. Zvýšení výkonu

Jelikož už je známé kondenzační teplo, je možné určit i přírůstek výkonu, který se následně přičte k jmenovitému výkonu kotle. Uvolněné teplo ze spalin je definované jako množství uvolněné energie z 1 kg paliva. Pro určení přesné hodnoty získaného výkonu, je nutné znát i množství paliva, který je potřeba kotli dodávat za jednotku času.

$$M_{pal} = \frac{Q_v}{Q_i \cdot \eta_k} \quad [kg/s] \quad (77)$$

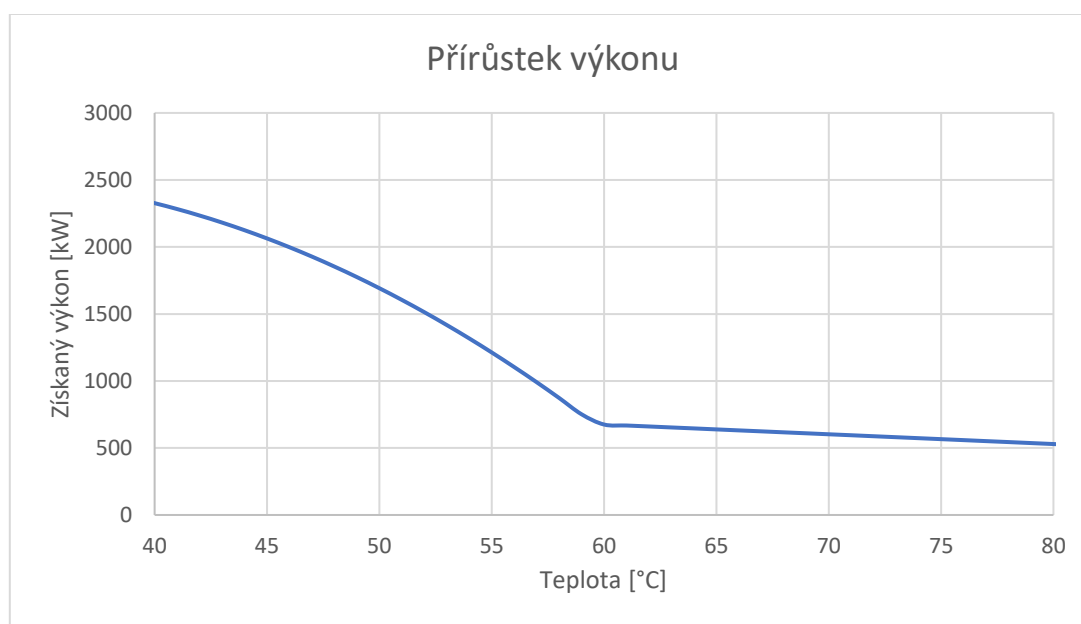
$$M_{pal} = 1,043 \quad kg_{pal}/s \quad (78)$$

Tudíž celkový přírůstek výkonu je pouhý součin hmotnosti paliva a uvolněného tepla:

$$P = M_{pal} \cdot Q_{kon} \quad [kW] \quad (79)$$

$$P = 1180,88 \quad kW \quad (80)$$

Na Obrázku 17 je vidět, že s klesající teplotou spalin nám roste i hodnota získaného výkonu. Průběh je téměř totžný jako u závislosti tepla uvolněného ze spalin, mění se pouze hodnoty na vertikální ose.



Obrázek 17 - Přírůstek výkonu

## 5.5. Zhodnocení výsledků

Cílem výpočetní části bylo zjistit, jak moc kondenzátory ovlivňují celkový výkon kotle. V první řadě je potřeba sledovat samotnou vlhkost biomasy, jenž je jeden z nejzásadnějších parametrů. Ta nejen výrazně ovlivňuje celkovou účinnost systému, ale také ukazuje, jak moc může být samotná kondenzace přínosná. Čím vyšší vlhkost biomasa má, tím větší objemový podíl vody v sobě obsahují vlhké spaliny a tím i samotné kondenzační teplo bude větší. V tabulce 13 jsou uvedeny hodnoty účinností a přírůstky výkonu z kondenzace.

Tabulka 13 – Hodnoty účinností a přírůstky výkonu

$W$ [%]	$Q_v$ [kW]	$\eta_k$ [%]	$Q_{pal}$ [kW]	$P$ [kW]	$Q_v + P$ [kW]	$\frac{Q_v + P}{Q_{pal}}$ [%]	$\frac{Q_v + P}{Q_v}$ [%]
<b>43,5</b>	8000	88,04	9086,78	1180,88	9180,88	101,04	114,76
<b>40</b>	8000	88,22	9070,29	1110,8	9110,8	100,44	113,89
<b>30</b>	8000	88,78	9011,04	895,15	8895,15	98,71	111,19
<b>20</b>	8000	89,18	8970,62	711,25	8711,25	97,11	108,89
<b>10</b>	8000	89,57	8931,56	711,25	8711,25	97,53	108,89

Jak je vidět z Tabulky 13, samotná účinnost kotle se s vlhkostí paliva výrazně mění a to tak, že s rostoucí vlhkostí paliva, nám klesá i účinnost kotle. Z toho by vypovídalo, že je efektivnější pracovat s kvalitnějším palivem, které se před spalováním vysuší na co nejnižší hodnotu vlhkosti. Z dosažených výsledků je ale patrné, že pokud budeme pracovat s méně kvalitním palivem (odpadní biomasa) a zavede se ke kotli kondenzátor, dokážeme tím zvýšit výkon kotle. V posledním sloupci je vidět, že čím vyšší vlhkost palivo má, tím dojde k vyššímu nárůstu výkonu kotle, což je způsobeno větším množstvím uvolněného latentního tepla. Dále je vidět že krom výkonu kotel se zvýší i samotná účinnost, která s výkonem úzce souvisí. Z původních 88,02 %, které by pro dané palivo zvolený kotel měl, dokážeme zvýšit účinnost až na hodnotu 101,04 %. Tím účinnost kotle přesahuje hodnotu 100 % a rozdíl účinností je 14,76 %. To ale neznamená, že dokážeme z paliva vyprodukovat více energie, než je jeho původní energetický potenciál. Pro výpočet účinnosti kotle na biomasu jsme počítali s výhřevností paliva, která nezohledňuje energetický potenciál obsažený ve vodní páře. Pokud bychom pracovali se spalným teplem, které zohledňuje i latentní teplo, tak se ve skutečnosti dobereme k účinnosti menší než 100 %. Z tabulky je také patrné, že zvýšení účinnosti úzce souvisí s vlhkostí paliva. Pokud objem vody obsažená ve spalinách roste, tím je i samotná kondenzace prospěšnější pro celý topný systém. Tím se nejen dokáže zvýšit efektivita spalování, ale také se ze spalin zachytí množství emisních látek do usazovací nádrže, které by za normálních podmínek vyšly komínem do atmosféry.

## 6. Závěr

První část této práce se zabývá rešerší, která popisuje druhy biomasy a kondenzace spalin. V kapitole s popisem biomasy jsem věnoval prostor základním informacím o biomase a dále jsem psal o technologiích pro získávání energie z biomasy. Dále jsem se v této kapitole věnoval rozdělení biomasy a průmyslem získávání její energie v ČR. Další část rešerše se zabývá popisem kotlů na biomasu, kde jsem rozebíral rozdíl mezi fluidním a roštovým kotlem a jejich principy fungování. Ve 4. kapitole je věnovaná pozornost kondenzaci, a to především technologiím pro realizaci kondenzace vlhkých spalin. Podkapitola kondenzace je v této práci velmi významná, jelikož popisuje hlavní princip fungování tepelných kondenzačních výměníků. Dále jsem se věnoval popisu samotných kondenzátorů, se kterými se dnes můžeme v praxi setkat, a principy jejich fungování.

Druhá část je věnovaná výpočtům. V první části výpočtů jsem si nejprve určil vlhkost biomasy a výkon kotle. Následně byly provedeny přepočty paliva a stechiometrické výpočty, z nichž jsem poté spočítal entalpii spalin. Za pomoci entalpií a výsledků ze stechiometrie jsem si určil jednotlivé typy ztrát, z nichž jsem zjistil i celkovou účinnost kotle bez použití kondenzace. Ve druhé části výpočtů je věnovaná pozornost hlavně získanému teplu ze spalin. Nejprve jsem potřeboval přepočítat hodnoty entalpií, jelikož bylo nutné začlenit skupenské teplo vodní páry. Provedl jsem tedy rozdělení entalpií vlhkých spalin na 2 samostatné složky, a to na entalpii suchých spalin a entalpii vodní páry. Poté byl už pouze proveden výpočet pro získání tepla a závislost získaného tepla na teplotě spalin. V poslední části výpočtů byly shrnuty výsledky a diskuse. Podobný princip technologie lze najít i v domácnostech, kde v klasických plynových kotlích je nainstalovaný výměník, který ochlazuje spaliny z plynu, aby tak navýšil efektivitu ohřevu vody.

Cílem této práce bylo zjistit, jaký tepelný přínos má kondenzace spalin pro celý topný systém a zdali je aplikace výměníku do kotle na biomasu přínosná. Výpočtem se prokázalo, že pokud spaliny ochlazují ze 150 °C na 55 °C, celková účinnost mého zvoleného kotle se zvýší až o 14,76 %. Tím se zároveň navýší i celkový výkon zvoleného kotle z 8 000 kW na 9 180,88 kW. Po aplikaci kondenzátoru se nejen zvyšuje výkon kotle, ale také dokáže zachytit výrazné množství emisních látek, které by normálně vyšlo komínem ven a z toho důvodu se instalace tepelného výměníku jeví jako velice přínosná, a to nejen z ekonomického, ale i z ekologického hlediska.

## Bibliografie

- [1] R. Kochan, „Bilance oxyfuel spalování ve fluidním kotli,“ 2019. [Online]. Available: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/83711/F2-BP-2019-Kochan-Radim-BP\\_Radim%20Kochan.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/83711/F2-BP-2019-Kochan-Radim-BP_Radim%20Kochan.pdf?sequence=-1&isAllowed=y). [Přístup získán 23. 2. 2024].
- [2] W. M. S. Tawfeeq, „Biomass energy,“ Říjen 2021. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/355204245\\_Biomass\\_Energy](https://www.researchgate.net/publication/355204245_Biomass_Energy). [Přístup získán 23. 2. 2024].
- [3] L. Pravda, „Biomasa jako obnovitelný zdroj energie,“ 2004. [Online]. Available: Dostupné: [https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2004/18\\_PravdaI.pdf](https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2004/18_PravdaI.pdf). [Přístup získán 2. 5. 2024].
- [4] M. Budiš, „Energetické využití biomasy,“ 2011. [Online]. Available: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=40314](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40314). [Přístup získán 2. 5. 2024].
- [5] D. Vobořil, „Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR,“ 2017. [Online]. Available: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>. [Přístup získán 2. 5. 2024].
- [6] A. Bufka, J. Veverková a D. Andronic, „Obnovitelné zdroje energie v roce 2021,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2023/1/Obnovitelne-zdroje-energie-2021-230125.pdf>. [Přístup získán 2. 5. 2024].
- [7] Z. Vitek, „Kotle na biomasu,“ 2010. [Online]. Available: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27929](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27929). [Přístup získán 23. 2. 2024].
- [8] J. Moskalík, M. Lisý a B. Marek, „Kotle na tuhá paliva,“ 2012. [Online]. Available: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>. [Přístup získán 2. 5. 2024].
- [9] J. Yliniemi, „Alkali activation-granulation of fluidized bed combustion fly ashes,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/323848125\\_Alkali\\_activation-granulation\\_of\\_fluidized\\_bed\\_combustion\\_fly\\_ashes](https://www.researchgate.net/publication/323848125_Alkali_activation-granulation_of_fluidized_bed_combustion_fly_ashes). [Přístup získán 2. 5. 2024].
- [10] S. Oka, Fluidized bed combustion, New York: Marcel Dekker Inc., 2004.
- [11] B. a. Wilcox, „Bubbling fluidized-bed boilers,“ [Online]. Available: <https://www.babcock.com/home/thermal/steam-generators/bubbling-fluidized-bed-boilers/>. [Přístup získán 2. 5. 2024].

- [12] L. Youchu a X. Zhang, „8. Circulating Fluidized Bed Combustion,“ v *Advances in Chemical Engineering*, Academic Press, 1994, pp. 331-388.
- [13] T. engineering, „Design & Operation of Circulating Fluidized Bed Boilers (CFB),“ [Online]. Available: <https://www.tetra-eng.com/fr/training-courses/design-operation-of-circulating-fluidized-bed-boilers-cfb>. [Přístup získán 2. 5. 2024].
- [14] Metal Building Manufactures Association, „Condensation Fact Sheet,“ 10 Leden 2001. [Online]. Available: <https://www.mbma.com/media/10.01.01Condensation.pdf>.
- [15] Chemistry learner, „Phase diagram of water,“ [Online]. Available: <https://www.chemistrylearner.com/phase-diagram-of-water.html>. [Přístup získán 23. 2. 2024].
- [16] P. Lukáš, „Kondenzace s přímým kontaktem médií,“ 2021. [Online]. Available: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/96244/F2-DP-2021-Pavel-Lukas-Kondenzace%20s%20primym%20kontaktem%20medii.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Přístup získán 23. 2. 2024].
- [17] Energy Education, „Latent Heat,“ 2021. [Online]. Available: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Latent\\_heat](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Latent_heat). [Přístup získán 23 2- 2024-].
- [18] I. Angelica, „Understanding psychrometric charts and dew points,“ 31. 7. 2021. [Online]. Available: <https://angelicaisa.com/blog/understanding-dewpoint>. [Přístup získán 23. 2. 2024.].
- [19] Z. Lyčka, „Mále teplovodní kotle na pevná paliva,“ 2002. [Online]. Available: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/2207-ling-vydavatelstvi-kotle.pdf>. [Přístup získán 2. 5. 2024].
- [20] T. Dlouhý, *Výpočty kotlů a spalovacích výměníků*, Praha: ČVUT, 1999.
- [21] J. Horák, F. Hopan, K. Krpec, P. Kubesa, J. Koloničný a T. Ochodek, „TZB Info,“ Stanovení účinnosti kotlů, 21. 4. 2014. [Online]. Available: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>. [Přístup získán 23. 2. 2024].
- [22] C. Marc, „Flue Gas Condenser for Biomass boilers,“ 2006. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1020328/FULLTEXT01.pdf>. [Přístup získán 2024 5.].
- [23] R. Sinha a K. K. Thakur, „Heat recovery from condensing heat exchanger,“ 22. 9. 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322069413>. [Přístup získán 2. 5. 2024].
- [24] Bosh, „Increasing combustion efficiency,“ [Online]. Available: <https://www.boiler-planning.com/en/efficiency/increasing-combustion-efficiency/flue-gas-temperature-or-flue-gas-loss.html#32590>. [Přístup získán 2. 5. 2024].

- [25] I. Veidenbergs, D. Blumberga, E. Vigants a G. Kozuhars, „Heat and Mass Transfer Processes in Scrubber of Flue Gas Heat Recovery Device,“ Leden 2000. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/258448311\\_Heat\\_and\\_Mass\\_Transfer\\_Processes\\_in\\_Scrubber\\_of\\_Flue\\_Gas\\_Heat\\_Recovery\\_Device](https://www.researchgate.net/publication/258448311_Heat_and_Mass_Transfer_Processes_in_Scrubber_of_Flue_Gas_Heat_Recovery_Device). [Přístup získán 23. 2. 2024].
- [26] R. Poškas, A. Syrvidas, V. Kulkovas, P. Poškas, H. Jouhara, G. Miliauskas a E. Puida, „Flue Gas Condensation in a Model of the Heat Exchanger: The Effect of the Cooling Water Flow Rate and Its Temperature on Local Heat Transfer,“ 9. 12. 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/24/12650>. [Přístup získán 9. 12. 2024].
- [27] J. Uotila, Heat recovery and enviromental impacts of flue gas condensing, Aalto university of chemical technology, 2015.
- [28] V. Šneberger, „Návrh opatření pro zvýšení účinnosti kotle na biomasu,“ [Online]. Available: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/110047/F2-DP-2023-Sneberger-Vit-Navrh%20opatreni%20pro%20zvyseni%20ucinnosti%20kotle%20na%20biomasu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. [Přístup získán 22. 5. 2024].