



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# NÁVRH A OPTIMALIZACE SPALOVACÍ KOMORY S ROŠTEM NA PALIVOVÝ MIX

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A COMBUSTION CHAMBER WITH A GRATE FOR FUEL MIX

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Zabloudil

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Pařízek, Ph.D.

BRNO 2022



# ZADÁNÍ ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Bc. Jan Zabloudil**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Procesní inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Pařízek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

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

**Návrh a optimalizace spalovací komory s roštem na palivový mix**

*Design and optimization of a combustion chamber with a grate for fuel mix*

## **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Volba vhodného zařízení pro spalování je v běžné praxi většinou spojena s konkrétním typem paliva, ať už se jedná o fosilní paliva či odpady (např. pro nebezpečný průmyslový odpad se běžně užívají rotační pece, pro komunální odpad spalovací komory s vratisuvným roštem, pro termické zpracování kalů etážové pece s fluidním ložem atd.). Na základě současných potřeb v oblasti energetického využití odpadů je nutné zabývat se termickým zpracováním různých druhů odpadů v jednom zařízení, tzn. uvažovat tzv. palivový mix. Jedná se o mnohem obtížnější úlohu, než je řešení spalování např. fosilních paliv, neboť odpad představuje značně heterogenní směs.

Typ práce: konstrukční s využitím znalosti technologie a možností simulačních výpočtů

## **Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je navrhnout a zkonstruovat nový typ roštu, který tvoří základní klíčovou část spalovací komory pro spalování palivového mixu biomasy, komunálního odpadu a zdravotnického odpadu.

Dílčí cíle diplomové práce:

- vypracovat přehled používaných konstrukcí roštů a ohnišť, popsat spalování na roštu a vznikající produkty spalování, zohlednit související legislativu
- prostřednictvím vhodného softwarového systému provést bilanční výpočty za účelem stanovení potřebných technologických parametrů

- vytvořit konstrukci nového spalovacího roštu v programovém systému SolidWorks zajišťující optimalizaci chlazení a regulace spalování
- navrhnout vhodný odvod škváry/popela
- stanovit rozměry spalovací komory pro danou zpracovatelskou kapacitu za předpokladu volby vhodné vyzdívky

Požadované výstupy: průvodní zpráva, 3D model a výkresová dokumentace, doložení potřebných výpočtů

Rozsah práce (průvodní zprávy): přibližně 50 stran

### **Seznam doporučené literatury:**

YIN, Ch. a Shuangshuang L. *Advancing grate-firing for greater environmental impacts and efficiency for decentralized biomass/wastes combustion*. *Energy Procedia* [online]. 2017, 120, 373–379. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.07.2

RYBÍN, M. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. Praha: SNTL, 1985, 420 s. ISBN 04-227-85

LIBICH, V. a L. OCHRANA, *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1989, 245 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1078-7.

CHEREMISINOFF, P. *Waste incineration handbook*. Vyd. 2. Des Plaines: Cahners Publishing Company, 1992, 154 s. ISBN 0-7506-0282-1

## ABSTRAKT

Práce zahrnuje řešení problematiky spalování na roštu, která slouží k sestavení výpočetního nástroje ve formě interaktivního skriptu v programovacím jazyku Matlab. Program je použit pro získání parametrů zařízení v závislosti na zadaných vlastnostech vstupující palivové směsi, pro nalezení vhodné konstrukce s ohledem na technologické požadavky a zpracování základní modelové a výkresové dokumentace.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Roštové ohniště, spalovací komora, palivový mix

## ABSTRACT

The thesis contains literature research in grate firing, leading to compilation of a computing tool in form of an interactive script written in the scripting language Matlab. The program is subsequently used for calculation of the apparatus' parameters, finding the optimal design with respect to technological requirements and creation of basic model and drawings.

## KEYWORDS

Grate furnace, combustion chamber, fuel mix

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZABLOUDIL, Jan. Návrh a optimalizace spalovací komory s roštem na palivový mix. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137265>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Tomáš Pařízek.

## PODĚKOVÁNÍ

Autor by na tomto místě rád poděkoval Ing. Pařízkovi za vedení práce; prof. Stehlíkovi za to, že s ochotou vypsál téma; Ing. Křišpínovi za to, že práci celou poctivě přečetl a konstruktivně posoudil; Ing. Hajnému za zajímavá data a možnost konzultace a doc. Balášovi za doporučení několika přínosných kusů literatury. V neposlední řadě samozřejmý dík patří autorovým rodičům a školnímu systému naší drahé vlasti, bez kterýchžto faktorů bych stěží mohl usilovat o inženýrský titul.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Tomáše Pařízka, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED POUŽÍVANÝCH KONSTRUKCÍ ROŠTŮ A OHNIŠŤ</b>	<b>13</b>
2.1.1	Roštová ohniště	13
<b>2.2</b>	<b>Typy roštů</b>	<b>14</b>
2.2.1	Pevné rošty – s nehybnou vrstvou paliva	15
2.2.2	Stupňové a přesuvné rošty – s občasným přesouváním paliva	15
2.2.3	Řetězové a pásové rošty – s kontinuálním přesouváním paliva	17
2.2.4	Geometrie spalovací komory	18
<b>3</b>	<b>SPALOVÁNÍ NA ROŠTU A VZNIKAJÍCÍ PRODUKTY SPALOVÁNÍ</b>	<b>21</b>
3.1.1	Průběh spalování na roštu	21
3.1.2	Průběh hoření po výšce vrstvy paliva	22
3.1.3	Minimální množství spalin	23
3.1.4	Skutečné množství spalin	25
3.1.5	Emise při hoření	25
<b>4</b>	<b>SOUVISEJÍCÍ LEGISLATIVA</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Legislativní požadavky</b>	<b>29</b>
4.1.1	Evropská legislativa	29
<b>4.2</b>	<b>Legislativně určené technické podmínky provozu</b>	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Technické normy</b>	<b>31</b>
<b>4.4</b>	<b>Emisní limity</b>	<b>32</b>
4.4.1	Podmínky provozu pro stacionární zdroje tepelně zpracovávající biomasu	32
4.4.2	Podmínky provozu pro stacionární zdroje tepelně zpracovávající odpad	33
4.4.3	Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje ke spalování více druhů paliv	34
4.4.4	Podmínky provozu pro stacionární zdroje tepelně zpracovávající odpad spolu s jiným palivem	34
<b>5</b>	<b>ZADÁNÍ ŘEŠENÉHO PŘÍPADU – PALIVOVÝ MIX</b>	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>Návrhový výpočet zařízení pro zvolenou kombinaci paliv</b>	<b>36</b>
5.1.1	Volené parametry	36
<b>6</b>	<b>NÁVRH KOMORY A ROŠTU PRO SPALOVÁNÍ PALIVOVÉHO MIXU</b>	<b>38</b>
<b>6.1</b>	<b>Výpočtový program</b>	<b>40</b>
6.1.1	Popis programu	40
<b>6.2</b>	<b>Bilanční výpočty pro stanovení potřebných technologických parametrů</b>	<b>41</b>

6.2.1	Výpočet: výhřevnost	41
6.2.2	Výpočet: spalovací vzduch	42
6.2.3	Výpočet: spaliny	44
6.2.4	Výpočet: teoretická a adiabatická teplota spalin	46
6.2.5	Výpočet: ztráty při spalování	48
<b>6.3</b>	<b>Rozměry spalovací komory pro danou zpracovatelskou kapacitu</b>	<b>52</b>
6.3.1	Výpočet: rozměry roštu	52
6.3.2	Výpočet: vstupní otvor – rozměry	53
6.3.3	Výpočet: klenby	54
6.3.4	Výpočet: odvod spalin	57
6.3.5	Výpočet: tepelný výpočet ohniště	59
<b>6.4</b>	<b>Konstrukce komory v grafickém prostředí SolidWorks</b>	<b>66</b>
<b>6.5</b>	<b>Chlazení, regulace spalování, odvod škváry/popela</b>	<b>68</b>
6.5.1	Regulace	68
6.5.2	Odvod popela a strusky	69
6.5.3	Vyzdívka a izolace	72
6.5.4	Návrhový výpočet vyzdívky	77
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>81</b>
7.1	Zhodnocení provedených prací	81
7.2	Budoucí práce	82
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>88</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>91</b>
10.1	Obrázky	91
10.2	Grafy	92
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>93</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>94</b>



# 1 ÚVOD

Roštová ohniště jsou nejstarším, průběžně vyvíjeným druhem ohnišť. I do budoucna můžeme předpokládat jejich významný podíl v průmyslových aplikacích.

Ačkoli rošty s kontinuálním posuvem budou se snižujícím se podílem uhlí v energetice postupně ustupovat, rošty s občasným posuvem, kterým se tato práce blíže věnuje si svoji pozici díky vhodným vlastnostem v aplikaci spalování a spoluspalování odpadů udrží. Při termickém využití komunálních odpadů (a odpadů vlastnostmi se jim blížících) je roštové spalování jak po technické, tak po ekonomické stránce vhodnější, než spalování ve fluidní vrstvě. Nevyžaduje totiž úpravu vstupujícího paliva.

Historický vývoj vedl k vytvoření několika rozličných druhů spalovacích roštů, užívaných k různým účelům. Autor této práce volí vhodný typ roštu pro návrh spalovací komory, umožňující optimalizované hoření směsi spoluspalovaných pevných paliv.

Předložená práce řeší postup od volby koncepce zařízení založené na rešerši, přes sestavení algoritmu návrhového výpočtu zařízení, jeho aplikace v podobě programu ve skriptovacím jazyce Matlab (verze R2020b) až po aplikaci při získání návrhových výkresů zařízení pro požadované vstupní parametry.

Roštová ohniště jsou vhodná jako spalovací zařízení pro kotle malých až středních výkonů, většinou do výkonů asi 40 MW [1]. Pro vyšší výkony je potřeba příliš velká plocha roštu, při takových rozměrech vykazuje spalovací systém značně pomalou odezvu na jakoukoli změnu řízení a nelze dostatečně účinně řídit proces spalování. Rozměrově dosahují největší plochy spalovacích roštů mezních hodnot 80-100 m<sup>2</sup> [1].

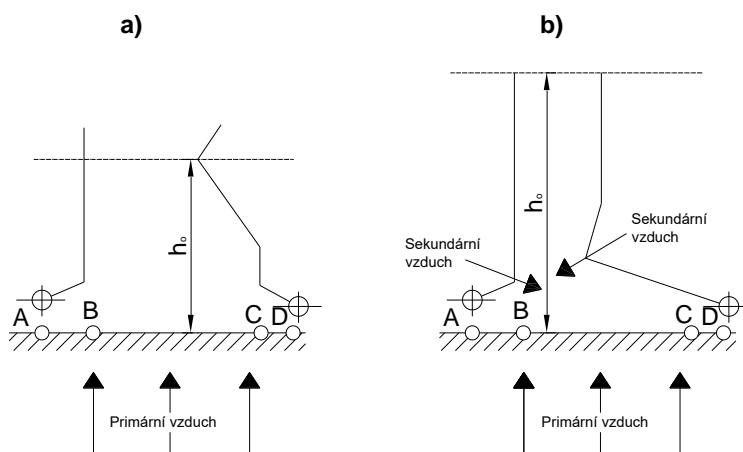
## 2 PŘEHLED POUŽÍVANÝCH KONSTRUKCÍ ROŠTŮ A OHNIŠŤ

### 2.1.1 Roštová ohniště

Prostor ohniště je ohraničen palivovým roštem, přední a zadní klenbou. Klenby mají zároveň funkci svedu spalin do jejich odtahu tak, aby došlo k jejich promísení se sekundárním (popřípadě i terciárním) vzduchem a dokonalému dohoření. Stěny komory mohou být chlazené, např. využitím membránové stěny ohniště, která zároveň poslouží jako teplosměnná plocha parního kotle [2].

Dle kvality paliva dochází ke spalování bez svítivého plamene, které je vázané pouze na vrstvu paliva, nebo se svítivým plamenem, kdy k hoření dochází mimo vrstvu pevného paliva i v prostoru nad roštem, kde hoří prchavé látky<sup>1</sup>.

- *Ohniště s jedním ohniskem hoření:* pro kvalitní uhlí, je významné pouze hoření v sypané vrstvě pevného paliva. Jejich tvar je typicky širší a nižší, neboť není třeba zajišťovat mnoho prostoru pro hoření nad roštem [1, 3, 4].
- *Ohniště se dvěma ohnisky hoření:* pro pevná paliva nižších kvalit, například biomasu, či spalitelný odpad. Jedná se o ohniště se svítivým plamenem. Tvar spalovací komory je odlišný od předchozího typu v tom, že je třeba zajistit dostatečné promísení a vyhoření prchavých hořavin. Tato ohniště jsou proto typicky štíhlejší a vyšší, s přívodem sekundárního vzduchu nad hořící vrstvu [1, 3, 4].



Obrázek 1: a) ohniště s jedním ohniskem hoření; b) ohniště se dvěma ohnisky hoření [5]

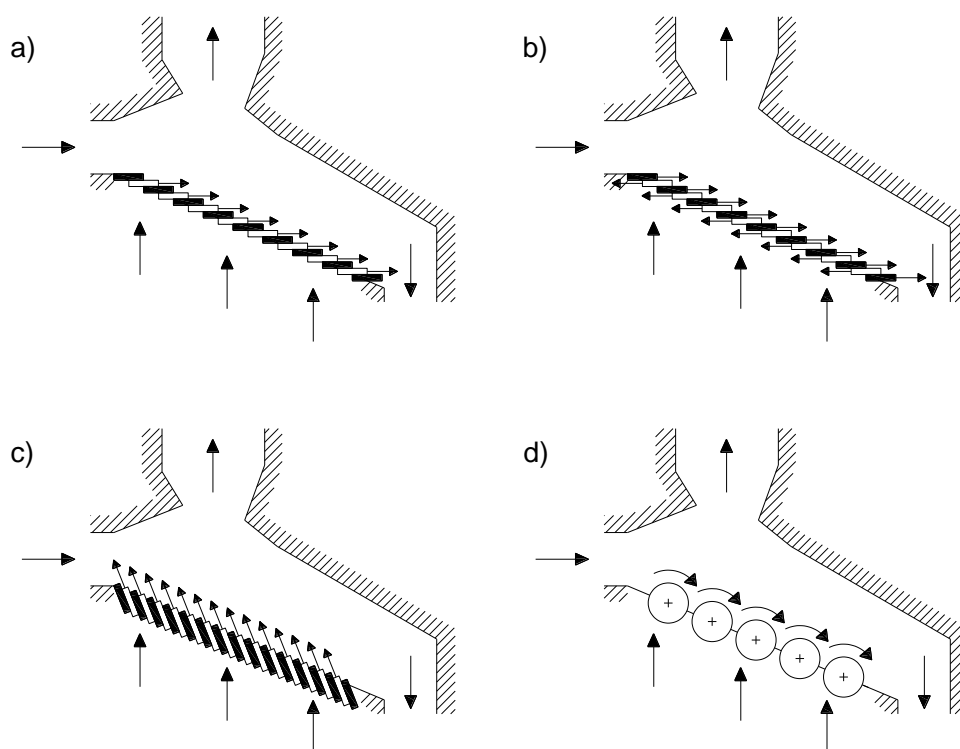
<sup>1</sup> Typické pro paliva nižších kvalit, např. odpady

Průběh hoření paliva na roštu se dá rozdělit do několika fází. Po nadávkování na rošt dochází napřed k jeho sušení, kdy se odpařuje volná voda. Další fází je odpar prchavých látek následovaný jejich zápalom. Prchavé látky mají obecně nižší zápalnou teplotu než hořlaviny pevné, proto k zápalu pevné hořlaviny dojde až posléze. Poslední fází je dohoření a odvod strusky z prostoru ohniště [1, 6].

## 2.2 Typy roštů

V předchozí kapitole byla naznačena vývojová stádia spalovacích roštů, svou podstatou se z nich vyčlenily tři skupiny, do kterých se dají jednotlivé roštové systémy zařadit: rošty s nehybnou vrstvou paliva, rošty s občasně přesouvanou vrstvou paliva a rošty s kontinuálním posuvem vrstvy paliva. V současné době se roštové kotle využívají primárně v zařízeních pro spalování biomasy a odpadů [3, 4], výjimkou jsou řetězové a pásové rošty, které se pro tento účel nehodí [1].

Česká technická norma ČSN 06 3090 [7], která je v současné době v platnosti pro zařízení k termickému nakládání s odpady [8], dělí pevné rošty bez přesuvu paliva dle polohy hlavní roviny na rošty rovné a šikmé a rošty s pohyblivými roštnicemi na natřásací, pásové, posuvné, otočné a válcové.



Obrázek 2: Konstrukční typy roštů s občasným posouváním paliva: a) přesuvný rošt, b) protiběžný přesuvný rošt, c) vrativý rošt, d) válcový rošt

## 2.2.1 Pevné rošty – s nehybnou vrstvou paliva

Nejjednodušší typ. Dnes pouze v ohništích malých kotlů pro místní vytápění, výjimečně u starších plamencových kotlů pro pevná uhlí a malých periodických pecí na odpad (do maximální kapacity 200 kg/h) [7]. Ohniště s pevným roštem též sloužila v malých vsázkových spalovenských zařízeních na tuhý odpad. U takových zařízení neprobíhá kontinuální provoz<sup>2</sup> a tak se nehodí pro obvyklé zpracovatelské kapacity [6].

Jelikož je palivo dávkováno na již hořící vrstvu, dochází zde ke spodnímu zápalu. Jednotlivé fáze hoření na roštu (sušení, uvolnění prchavé hořlaviny, hoření pevné složky a dohoření) je nemožné odlišit. Pokud není spalováno vysoce kvalitní palivo [1], je třeba dodávat nad rošt sekundární vzduch pro vyhoření prchavých složek.

Vždy je přítomna značná ztráta mechanickým nedopalem, úletem a propadem skrze rošt [1].

## 2.2.2 Stupňové a přesuvné rošty – s občasným přesouváním paliva

Jsou vhodné pro spalování pevných odpadů při kapacitách nad 200 kg/h s kontinuálním provozem [7]. Sestaveny jsou z roštnic, z nichž některé jsou opatřeny mechanickým posuvem. Byly vyvinuty kvůli odstranění nevýhodných vlastností pevných roštů. Mají podstatně nižší propad, hořící vrstva je při průchodu spalovací komorou promíchávána a vstupující palivo není přidáváno shora, takže je oddělena fáze sušení od fáze zápalu [1, 4, 9].

### Přesuvné rošty

Přesuvné rošty mají značnou výhodu ve své univerzalitě. Rozsah použití je od spalování odpadů, přes biomasu až po uhlí. Zvláště vhodné jsou pak pro méněhodnotná paliva s výhřevností zhruba v rozmezí 10-15 MJ/kg. Často jsou užívány v aplikacích blízkých požadavkům na výstup této práce.

Nedoporučuje se spalovat na přesuvných roštech paliva o výhřevnosti vyšší, než 14,6 MJ/kg. Vyšší výhřevnost by vyžadovala dražší materiály, nebo vodní chlazení [2].

Jedná se o šikmé rošty složené z úzkých, odlévaných roštnic. Rovina roštu je nakloněna pod úhlem 15-20°. Pohyb přesouvající palivo vykonávají buď všechny roštnice, nebo častěji každá druhá řada. Pro použití ke spalování kvalitnějších paliv je třeba odlévat roštnice z vysocelegovaných ocelí, aby byly schopny odolávat vyšším teplotám při spalování [1]. Pohyb roštnic je zajištěn klikovým mechanismem či hydraulickými táhly.

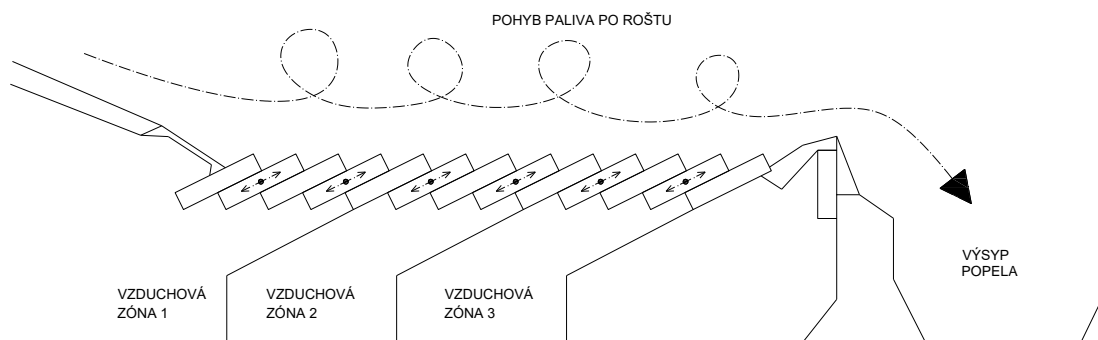
---

<sup>2</sup> Ohniště se vsázkovým provozem se nehodí k aplikacím v ZEVO

## Vratisuvné rošty

Vratisuvné rošty jsou dalším typem roštů úspěšně provozovaných v aplikacích spalování odpadu. Dva základní typy vratisuvných roštů jsou rošty kaskádové a rošty typu Martin.

Kaskádové vratisuvné rošty mají vodorovnou roštovou plochu a roštnice se pohybují pod úhlem příčně nahoru a dolů, se sklonem k výstupnímu konci komory [3].



Obrázek 3: Kaskádový vratisuvný rošt a jeho princip

Vratisuvné rošty typu Martin mají roštnice silně se svažující od vstupu paliva k výsypce. Sklon je vždy větší než u přesuvných roštů. Roštnice se pohybují pod úhlem vůči rovině roštu, v tomto případě však se sklonem směřovaným proti toku vrstvy paliva. Doba zdržení paliva na roštu a promíšení hořící vrstvy je ve srovnání s kaskádovými rošty vyšší.

Rošty typu Martin byly od prvního nasazení v roce 1959 instalovány ve více než 500 spalovacích linkách po celém světě, u nás jsou jimi osazeny např. spalovací komory ve spalovně SAKO Brno [10, 11] a obecně jsou běžně využívány v zařízeních pro energetické využití odpadu o výhřevnosti do 20 MJ/kg. Teplota hořící vrstvy odpadu se zde pohybuje v oblasti 1000 - 1100 °C, díky protiběžnému pohybu roštnic je však celý povrch roštu vždy za provozu pokryt celistvou vrstvou spalovaného paliva, což zabraňuje nadměrnému tepelnému zatěžování exponovaných částí roštu [11].

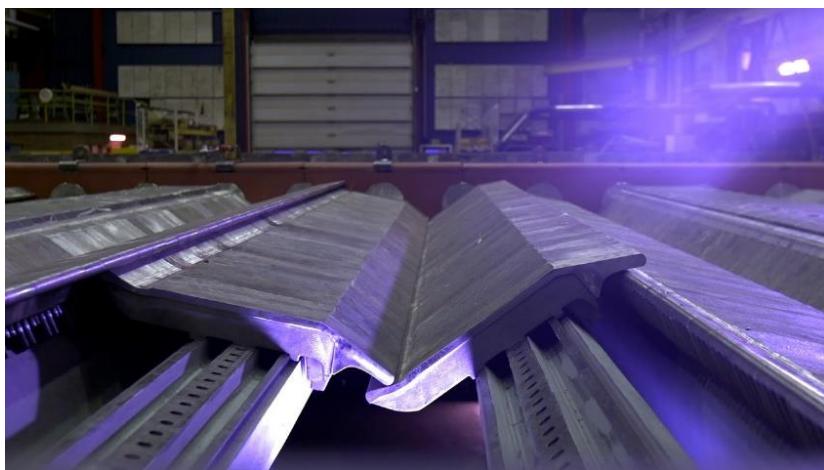
Do této kategorie je vhodné zahrnout i další typ užívaný při spalování odpadů, kterým jsou válcové rošty. Ty jsou sestaveny z řady dutých, vzduchem chlazených válců sestavených z roštnicových segmentů ze šedé litiny, zasazených opět do skloněné roviny roštu. Válce se otáčejí ve směru pohybu vrstvy paliva a jsou tedy vystaveny přímému působení tepla ze spalovací komory pouze po dobu poloviny své otáčky [1, 2].

## Vibrační rošty

Vibrační rošty se nejčastěji používají ke spalování biomasy, neboť špatně reagují na paliva s vyšším zastoupením popelovin. Skládají se z desky (plochy roštu) s průduchy pro primární vzduch a natřásacího zařízení, které s deskou vibruje [3]. Natřásáním se nad plochou roštu vytváří provzdušněná vrstva napomáhající hoření.

## Výkyvné rošty

Do této kategorie se řadí i výkyvné rošty typické pro firmu Babcock & Willcox Vølund [12, 13], konkurenta zmíněné firmy Martin [14]. Jejich výkyvný rošt *Dynagrate* je použit například v Kodaňské spalovně odpadů Amager Bakke [15]. Jde o alternativu k přesuvným a vratisuvným roštům. Pohyb konaný řadami roštnic posouvající vrstvu paliva ohništěm zde není posuvný, nýbrž rotační. Roštnice se pootočí kolem nosné osy a palivo po jejím povrchu klouže k dolnímu konci roštu, kde přepadává na další řadu roštnic. Zároveň je geometricky zajištěno, aby při vratném pohybu přepadlo zpět paliva méně.



Obrázek 4: Výkyvný rošt B&W Vølund Dynagrate [16]

## Vodou chlazené mechanické rošty

Jsou vhodné pro paliva s nízkým obsahem popelovin a vysokou výhřevností. Jako příklad poslouží například technologie *Dynamic water-cooled stepgrate* firmy Vyncke. Jde o vodou chlazené rošty konstruované pro spalování biomasy. V posledních letech se firma rozhodla je s úspěchem používat v kombinaci s odpadem jako multipalivové rošty. Technologie je značně rozšířená a je chráněna patentem [17, 18].

### 2.2.3 Řetězové a pásové rošty – s kontinuálním přesouváním paliva

Jsou vhodné zejména pro kvalitní černá uhlí, jejich použití pro spalování odpadu není doporučováno<sup>3</sup>. Starší z obou variant je rošt řetězový, u kterého jsou jednotlivé roštnice tvořeny články masivního Gallova řetězu [1, 19].

---

<sup>3</sup> Velké množství nečistot (štěrky, kusy kovu) v odpadech je značnou zátěží pro množství mechanických prvků řetězů

Plocha roštu je vodorovná, palivo je unášeno a spalováno na horní straně řetězu, přičemž dolní polovina je chlazena primárním spalovacím vzduchem. Díky tomu je možné spalovat paliva o vyšších výhřevnostech, jako jsou např. zmíněná kvalitní černá uhlí, aniž by docházelo k nechtěnému opalu roštnic [1, 2, 9].

Nevýhodou řetězového roštu je nutnost kvůli výměně jedné roštnice při odstávce demontovat celý pás.

Pásový rošt má oproti řetězovému konstrukční výhodu, která dovoluje měnit jednotlivé roštnice bez nutnosti kompletní demontáže, či dokonce za provozu. Roštnice jsou upevněny na příčné tyče, které jsou unášeny řetězy na obou bocích komory [9].

Rychlost pohybu pásových a řetězových roštů je nastavena tak, aby proběhly všechny fáze spalování a palivo co nejlépe vyhořelo. Bývá řádově zhruba 1-2,5 mm/s v závislosti na výšce hořící vrstvy a dalších parametrech ovlivňujících dynamiku spalování [1].

Zejména ohniště s pásovými rošty pro spalování uhlí s velkým podílem prachových složek bývají opatřena dávkováním za pomoci pohazovacího zařízení. Jejich podstata bývá buď mechanická, nebo pneumatická. Částice rozdílných hmotností tak dopadají na rošt v různých vzdálenostech od pohazovacího zařízení [1, 3, 9, 19].

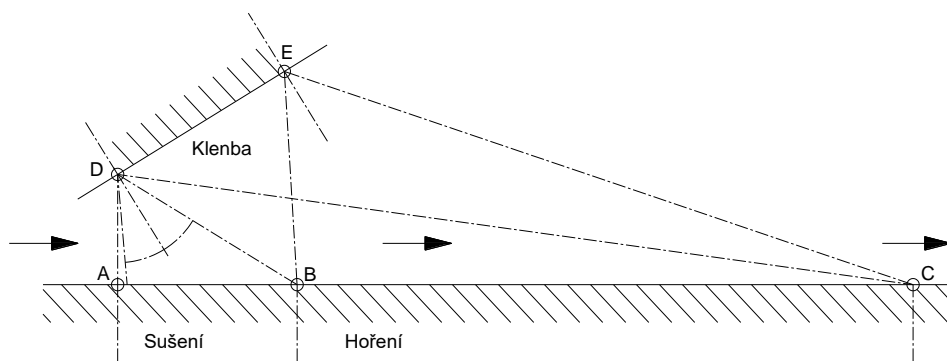
#### 2.2.4 Geometrie spalovací komory

Podmínkou správného průběhu hoření je dostatečný objem spalovací komory [1], ten však nesmí být příliš velký. Jak se v praxi ukazuje, nadměrně velký prostor spalovací komory může vést k problémům s udržení požadovaných parametrů spalin a potažmo udržení stanovených parametrů vyráběné páry.

Geometrie komory má obecně značný vliv na průběh spalování. Krom odpovídajícího objemu je zejména u méně kvalitních paliv nutné zajistit i vhodný tvar přechodu do dohořivací komory, který zajistí dostatečné promíšení spalin, okysličení zbytků uvolněných těkavých složek hořlaviny a jejich dokonalé vyhoření [1].

##### Klenba

Pokud je přední klenba spalovací komory navržena pod optimálním úhlem, funguje jako tepelné zrcadlo. Část tepla vyzařovaného při fázi hoření pevné hořlaviny je odražena do oblasti sušení a urychluje horní zápal čerstvého paliva ve srovnání se zápalem pouze radiací okolních spalin [1, 3, 18, 20]. Vliv má kromě úhlu odrazu i tepelná pohltivost vyzdívky klenby. V případě šikmých roštů je možné obdobně do jisté míry využívat i klenbu zadní [1].



Obrázek 5: Přední klenba jako tepelné zrcadlo

## Souproudá, protiproudá a středoproudá ohniště

Relativní pohyb paliva na roštu a produkovaných spalin je důležitý prvek geometrie při návrhu ohniště. Podle něj se ohniště dělí na protiproudá, souproudá a se středovým tokem [12, 21, 22].

### Souproudá ohniště

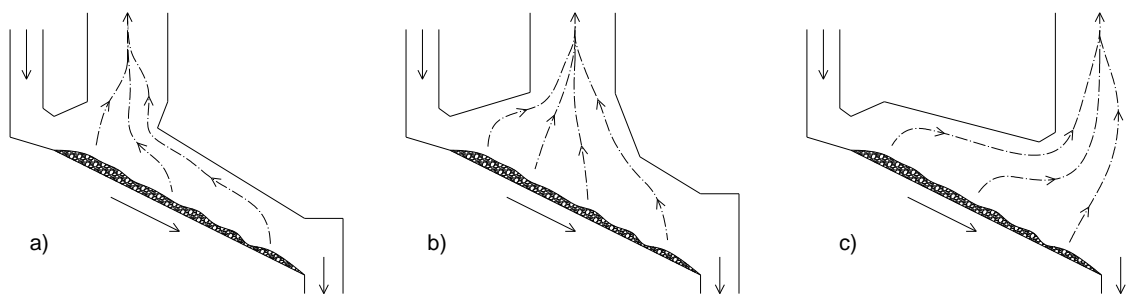
Souproudá ohniště obecně produkují nižší emise CO a  $\text{NO}_x$ , neboť geometrie nutí všechny pyrolýzou produkované plyny procházet skrze zóny s maximální teplotou při dlouhé zadrži, což vede k lepšímu vyhoření těkavé hořlaviny. Odvod spalin je posunut k čelu ohniště, kde je prakticky odstraněna přední klenba. Zadní klenba bývá níže nad roštem a snížena paralelně s rovinou roštu, což nutí produkované plyny proudit těsně nad pevnou hořlavinou a intenzifikovat hoření v obou ohniscích. Jsou vhodná pro paliva s vyšší výhřevností [12, 21–23].

### Protiproudá ohniště

Protiproudá ohniště mají vhodnou oblast využití u paliv o nižší výhřevnosti a zvýšené vlhkosti. Naopak vůči souproudým ohništím mají výraznou přední klenbu, zato zadní klenba je pouze krátká. Veškeré plyny produkované po délce roštu jsou v této geometrii nuceny protékat nad segmentem roštu, kde probíhá sušení. Jejich entalpie tedy přispívá odpaření vlhkosti, zkracuje délku sušícího úseku na roštu a tím zvyšuje celkovou účinnost zařízení [21–23].

### Středoproudá ohniště

Středoproudá ohniště jsou nejběžnější typ s nejmenší plochou stěn, což vede na menší množství vyzdívky a případně plochu membránové stěny. Jsou nejčastěji používána ve spalovnách komunálních odpadů pro svou univerzálnost, neboť jsou kompromisem mezi prvními dvěma typy [12, 23]. Tato geometrie je tedy pro svoji univerzálnost použita pro účely této práce.



Obrázek 6: Geometrie ohniště vhodných pro paliva dle podílu těkavých hořavin; a) protiproudé ohniště, b) středoproudé ohniště, c) souproudé ohniště

## 3 SPALOVÁNÍ NA ROŠTU A VZNIKAJÍCÍ PRODUKTY SPALOVÁNÍ

### 3.1.1 Průběh spalování na roštu

Na rošt je nové palivo přidáváno postupně shora a přesouvá se mechanicky po délce roštu ke škvárové výsypce. Čerstvé palivo je sypáno na již přítomnou vrstvu paliva na roštu, zároveň na něj působí sálavé teplo spalin ve spalovací komoře. Je tedy třeba rozlišovat dva principy zápalu čerstvého paliva - spodní a horní zápal [1, 3].

Pro zajištění hoření je třeba dostatečné okysličování. K palivu je nutné přivádět dostatečné množství spalovacího vzduchu do dvou kritických oblastí spalovací komory. Tyto dva proudy jsou označovány jako primární a sekundární vzduch.

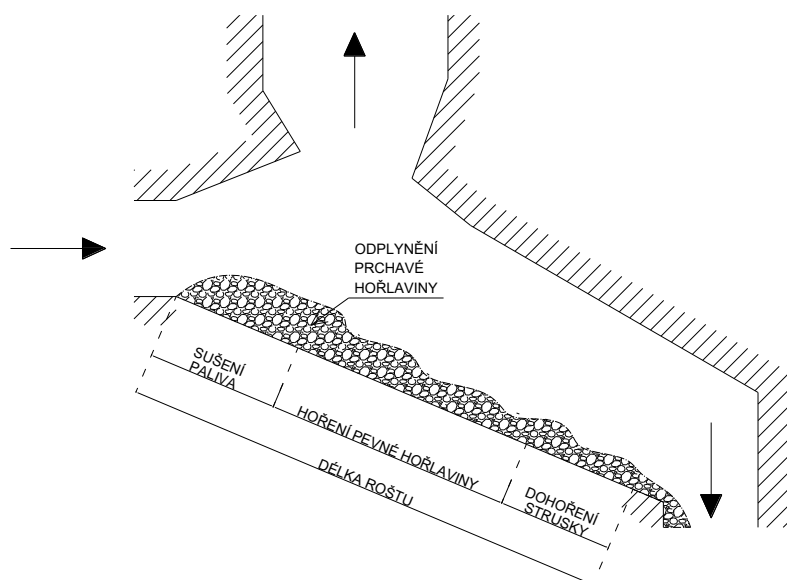
Primární vzduch je dmýchán do vrstvy paliva skrze otvory v roštu. Jeho úkolů je hned několik. Jednak přivádí kyslík do oblasti hoření, ale též ochlazuje hmotu roštu, který by se jinak přehřál. Předehřátý, nebo s recyklovanými spalinami smíšený primární vzduch může pomáhat urychlení fáze sušení paliva a v neposlední řadě je někdy výhodné přivádět větší, než stechiometrické množství primárního vzduchu do poslední sekce roštu kvůli dochlazení vyhořelých pevných zbytků [6].

Sekundární vzduch je vháněn až do prostoru komory nad vrstvu paliva na roštu a jeho účel je okysličování hořících prchavých plynných látek. Od druhu paliva, resp. podílu uhlíku v jeho hořlavině se odvíjí množství uvolňovaných prchavých složek, tedy i množství potřebného sekundárního vzduchu. Při spalování kvalitních antracitů tedy není použití sekundárního vzduchu nutné, naopak pro spalování biomasy či odpadů tvoří značnou část (v řádu desítek procent) přiváděného okysličovačla. Jelikož aplikace řešená v této práci uvažuje několik různých druhů paliv nízké kvality, je se sekundárním vzduchem uvažováno [1–3].

Moderní ohniště mají značně větší podíl sekundárního ku primárnímu vzduchu (až 60/40 oproti starším 20/80). Záleží však na tom, zda je rošt chlazený vodou, či vzduchem [24].

V některých specifických případech, kdy hrozí nedopal prchavých složek je možné použít i terciární vzduch vstupující do prostoru dohořívání výše nad úroveň dávkování sekundárního vzduchu [1].

Samostatnou kapitolu tvoří tzv. falešný vzduch. Jeho přítomnost je nechtěný jev, kdy je netěsnostmi v tělese spalovací komory či kotle přísáván vzduch z okolí. Tento jev způsobuje pokles účinnosti zařízení [1, 2].



Obrázek 7: Fáze hoření na roštu

### 3.1.2 Průběh hoření po výšce vrstvy paliva

Vzduch vstupuje skrze roštnice do vrstvy paliva, ta se dá po výšce rozdělit do několika spalovacích oblastí podle převládající reakce probíhajícího hoření [1].

Primární spalovací vzduch zespoda vstupuje skrze rošt do vrstvy paliva. Napřed se dostává do tzv. první oxidační oblasti, kde dochází k prvotní oxidaci uhlíku obsaženého v hořlavině paliva na CO.



Nad touto oblastí oxidace pokračuje ve druhé oxidační oblasti a převažujícím produktem je dále CO<sub>2</sub> dle rovnice



V oxidačních oblastech klesne koncentrace kyslíku, který je nově vázán v oxidech uhlíku po proběhnutých exotermických reakcích hoření.

Nad oxidačními vrstvami se nachází oblast s opačnými, čili redukčními účinky. Pokles koncentrace kyslíku ze spalovacího vzduchu zde umožní převahu redukční reakce zvané Boudourdova [1].



Vznikající CO se však dostává do prostoru nad hořící vrstvou paliva, kam je přiváděn sekundární vzduch. Ten kromě hoření prchavých látek z paliva umožní také zpětnou oxidaci CO na CO<sub>2</sub>.



### 3.1.3 Minimální množství spalin

Ze stechiometrie oxidačních reakcí složek palivové směsi a množství spalovacího vzduchu lze dále dopočítat množství suchých a vlhkých spalin.

Suché spaliny

Množství suchých spalin generovaných z hmotnostní jednotky palivové směsi je sumou množství každého z plynných produktů hoření směsi paliv a přiváděného spalovacího vzduchu.

Jak již bylo zmíněno výše, množství vznikajících halogenvodíků je v porovnání s ostatními složkami spalin zanedbatelné. Z toho důvodu halogeny obsažené v palivu v následujících rovnicích nevystupují.

Suma zanedbatelných složek potom vypadá následovně [25]:

$$O_{sp,min}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.5)$$

Kde každý ze sčítanců je sumou množství dané složky produkované hořením a přivedené spolu se vzduchem.

Chemický přístup

Z pohledu chemické stechiometrie reakcí pak lze jednotlivá hořením produkovaná množství odvodit obdobným způsobem, jako je zde naznačený postup pro hoření uhlíku:

$$O_{CO_2,spal} = \frac{C^r}{100 \cdot M_C} \cdot n \cdot V_M \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.6)$$

Kde  $C^r$  [%] je hmotnostní procento uhlíku v palivu,  $M_C$  [kg/kmol] molární hmotnost uhlíku,  $n$  [–] koeficient udávající stechiometrický počet molů vstupující do reakce a  $V_M$  [m<sup>3</sup>/kmol] standardní molární objem plynu.

Technický přístup

Sčítance sumy  $O_{sp,min}^S$  je pro spalovací komory vhodné počítat dle korigovaných vztahů uvedených v literatuře [18, 25–28]. Ve vzorcích je možné vidět podobnost s odvozením dle předchozí podkapitoly.

CO<sub>2</sub> ve spalinách:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,011} + \frac{CO_{2,air}^S}{100} \cdot O_{air,min}^S \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.7)$$

SO<sub>2</sub> ve spalinách:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S_{spal}^r}{32,065} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.8)$$

N<sub>2</sub> ve spalinách:

$$O_{N_2} = \frac{22,41}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + \frac{N_{2,air}^S}{100} \cdot O_{air,min}^S \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.9)$$

Ar ve spalinách:

$$O_{Ar} = \frac{Ar_{air}^S}{100} \cdot O_{air,min}^S \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.10)$$

Při výpočtech spalovenských kotlů, kdy se předpokládá nekonzistentní složení paliva, nebo není znám elementární rozbor se občas používají empirické vztahy objemu spalin na výhřevnosti odpadu <sup>4</sup> [29, 30].

Vlhké spaliny

Pro vyčíslení množství vlhkých spalin je k výše vypočteným suchým spalinám nutné přičíst množství vodní páry. Tato pára se do spalin dostává několika způsoby.

- |   |                      |
|---|----------------------|
| 1. Vznik vodní páry oxidací vodíku v palivu     | $O_{H_2O}^H$         |
| 2. Odpaření vlhkosti v palivu                   | $O_{H_2O}^W$         |
| 3. Vnesená vlhkost ze spalovacího vzduchu       | $O_{H_2O,min}^{Air}$ |
| 4. Odpaření vody přivedené regulačními tryskami | $O_{H_2O}^{Trysk}$   |

Minimální objem vodní páry ve spalinách tedy je:

$$O_{H_2O} = O_{H_2O}^H + O_{H_2O}^W + O_{H_2O,min}^{Air} + O_{H_2O}^{Trysk} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.11)$$

$$O_{H_2O} = \frac{44,83}{100} \cdot \frac{H_{korig}^r}{4,032} + \frac{22,41}{100} \cdot \frac{W^r}{18,015} + (f - 1) \cdot O_{air,min}^S + O_{H_2O}^{Trysk} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right]$$

Vodní trysky v moderních spalovacích komorách mají dva hlavní úkoly. Hašením zabraňují prohořívání paliva v dávkovacím kanále a také mohou aktivně pomáhat s regulací teploty v komoře odebíráním části tepla pro odpaření nástřikové vody – to však vede ke zvýšení objemu spalin.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> V této práci je využit klasický přístup výpočtu se znalostí elementárního rozboru paliva

<sup>5</sup> Pokud není ve spalinovodu zařazen kondenzační tepelný výměník, je tak však snížena termická účinnost zařízení

Minimální množství vlhkých spalin pak vychází:

$$O_{sp,min} = O_{sp,min}^S + O_{H_2O} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.12)$$

### 3.1.4 Skutečné množství spalin

Skutečné množství spalin se určí přičtením přebytečného vzduchu, který není potřebný pro teoretické stechiometrické spalování. Ten lze vyjádřit s využitím koeficientu přebytku vzduchu.

Skutečné množství suchých spalin:

$$O_{sp}^S = O_{sp,min}^S + (\alpha - 1) \cdot O_{air,min}^S \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.13)$$

Skutečné množství vlhkých spalin:

$$O_{sp} = O_{sp,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{air,min} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (3.14)$$

### 3.1.5 Emise při hoření

Při hoření dochází k emisi plyných oxidů složek hořlaviny, které se v dalších kapitolách uvažují za některé z hlavních složek proudu spalin. Tyto složky spalin jsou dány stechiometrií spalování.

Zároveň jsou však v nižších mírách emitovány i další látky, jejichž přítomnost v prostředí je nutné udržovat na nízkých, v ideálním případě nulových úrovních. V následující kapitole jsou proto shrnuty emitované látky, které mají velký význam z environmentálního hlediska, nicméně jejich význam při návrhovém výpočtu spalovacího zařízení je nižší.

Emise halogenových sloučenin

Paliva běžně neobsahují dostatečné množství halogenů (zejména chlor, fluor), aby se jejich vliv významně projevil na uvolněném teple či množství spalin, vznikající halogenvodíky ale mají nepříznivý dopad na korozi zařízení, kdy kondenzují jako příslušné kyseliny (chlorovodíková, fluorovodíková). Kromě poškození teplosměnných ploch zařízení se unikající halogenvodíky podílí na vzniku kyselých dešťů. Při nevhodných podmínkách spalování halogenů mohou v malém, ale kvůli nebezpečnosti nezanedbatelném měřítku vznikat také dioxiny [1].

## Halogenvodíky ve spalínách

Kromě negativního vlivu na emisní projevy spalovacího tepelného zdroje a korozivního působení, které má významný vliv při návrhu konvekčních ploch kotlů <sup>6</sup> má množství halogenů v palivu i další vliv, který se projeví přímo při výpočtu hoření.

Při zvyšujícím se podílu halogenů v palivu je vznikem halogenvodíků také odebrán větší podíl vodíku, který nemůže reagovat s kyslíkem za vzniku vody [1, 31]. Pokud je tedy množství halogenů nezanedbatelné, je třeba toto zahrnout do výpočtu množství vznikající vodní páry, která je výraznou složkou spalín [1].

S přihlédnutím k stechiometrickým rovnicím vzniku chlorovodíku a fluorovodíku je možné počítat při vzniku páry s již korigovaným množstvím vodíku v hořlavině:

$$H_{h,korig} = H_h - \left( \frac{Cl_h}{100} \cdot \frac{M_H}{M_{Cl}} + \frac{F_h}{100} \cdot \frac{M_H}{M_F} \right) \left[ \frac{kg}{kg} \right] \quad (3.15)$$
$$H_{h,korig} = H_h - \left( \frac{Cl_h}{100} \cdot \frac{1,0079}{35,453} + \frac{F_h}{100} \cdot \frac{1,0079}{18,998} \right) \left[ \frac{kg}{kg} \right]$$

## Emise oxidů dusíku

Stejně, jako tomu je v případě halogenvodíků, není tvorba NO<sub>x</sub> tak významná z pohledu množství spalín, jako spíše z hlediska emisní situace.

Oxidy dusíku, souhrnně označované jako NO<sub>x</sub>, mají při vypouštění do atmosféry velice nepříznivý vliv na životní prostředí. Společně s oxidy síry jsou hlavními původci kyselých dešťů. Z těchto environmentálních důvodů jsou pro horní hranici přípustného množství vypouštěného při provozování dané technologie stanoveny emisní limity, v ČR tak určuje zákon 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [32].

Hlavní složkou NO<sub>x</sub> je NO, přítomno je malé množství NO<sub>2</sub> a stopy N<sub>2</sub>O. Legislativní limit je určen jako ekvivalent NO.

Značný vliv na množství tvořícího se NO<sub>x</sub> má zejména teplota plamene, obsah dusíku v palivu, teplota a přebytek spalovacího vzduchu [22, 33, 34]. Právě velký vliv teploty vede k tomu, že důležitou roli při vzniku NO<sub>x</sub> hraje i doba zadržet na této teplotě [33].

Existují celkem 4 obecně přijímané principy vzniku, hlavní vliv mají první dva [34, 35]:

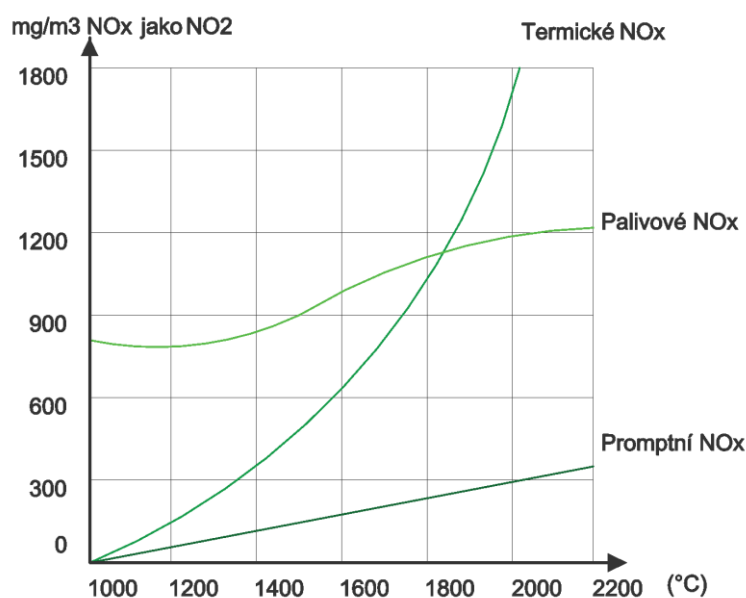
1. Při vysoké teplotě plamen oxidace vzdušného dusíku
2. Oxidace dusíku obsaženého v palivu
3. Reakce dusíku s uhlovodíkovými radikály na hraně plamene (malé množství)
4. Vznik NO přes N<sub>2</sub>O při zvýšeném tlaku a nadbytku kyslíku (malé množství)

---

<sup>6</sup> Výpočtům teplosměnných ploch se tato práce nevěnuje. Více k nim například v [3]

Je prakticky nemožné při návrhu zařízení dopředu určit skutečné množství produkovaného  $\text{NO}_x$ , i při numerických simulacích se dá dobře postihnout trend, ale zdaleka ne množství. Na to je nutné provést provozní testy <sup>7</sup>.

Při takových numerických odhadech trendu produkce NO je třeba dobře podchytit teplotní pole komory – příkladem může být skutečnost, že při teplotách kolem 2000 °C se produkce  $\text{NO}_x$  zdvojnásobí přibližně každých 90 °C [34].



Graf 1: Produkce  $\text{NO}_x$  v závislosti na teplotě [36]

## PCDD/F

Zkratky PCDD a PCDF popisují a zahrnují polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany. Jedná se o organické látky obecně vznikající při každém hoření, při kterém je přítomen chlor. Obecně platí, že paliva s nižším obsahem chloru v hořlavině produkují nižší množství PCDD/F [37].

S ohledem na povahu jejich vzniku je možné jejich emitované množství odhadovat na základě známých, dříve naměřených emisních faktorů pro daná paliva a konstrukce zařízení (resp. charakteristické spalovací procesy).

Obsah PCDD/F je často vyjadřován s užitím tzv. toxického ekvivalentu. Ten odpovídá sumě součinů složek (jednotlivých sloučenin spadajících do této skupiny) a odpovídajících faktorů srovnávajících vzájemně jejich negativní dopad na prostředí [37].

---

<sup>7</sup> I laboratorní test zde může sloužit pouze jako vodítko

## TZL

Tuhé znečišťující látky (TZL) jsou ve své podstatě prachy. Jedná se o částice pevných látek o nízkých frakcích (obecně 0,1  $\mu\text{m}$  – 0,5 mm). Vzhledem ke své podstatě tedy majoritně pochází z jiných zdrojů, než je spalování (např. prach z eroze, vulkanický prach, částice uvolněné broušením, úlet při mletí). Při spalování pak jde o částice v úletu – popílek [38]. Jejich množství se dá odhadnout dle zkušeností s daným typem zařízení.

Popílek je při spalování možné s vysokou účinností odlučovat ze spalin např. látkovými filtry, či elektrostaticky. Větší frakce odstředivě v cyklonech.

Kromě znečištění prostředí vycházejícího ze samé podstaty částic o malých rozměrech je s TZL spojen problém těžkých kovů, které se na částice vážou [38].

## 4 SOUVISEJÍCÍ LEGISLATIVA

### 4.1 Legislativní požadavky

Tato kapitola odkazuje na závazné legislativní podmínky platné pro ČR a jejich vliv na parametry spalovacích zařízení ve vztahu k směsím relevantních pevných paliv.

#### 4.1.1 Evropská legislativa

Směrnice a vyhlášky evropské legislativy se promítají do legislativy české a mají vliv na provoz zařízení využívajícího navrhovaný spalovací systém.

Směrnice definující odpady, které lze využít jako palivo pro výrobu energie:

- Směrnice evropského parlamentu a rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadů [39]
- Rozhodnutí rady 2003/33/EC, kterým se stanoví kritéria a postupy pro přijímání odpadů na skládky [40]
- Směrnice evropského parlamentu a rady 2008/98/ES ze dne 19.11. 2008 o odpadech [41]
- Rozhodnutí komise 2014/955/EU ze dne 18. 12 2014 (seznam odpadů) [42]
- Směrnice komise 2015/1127 ze dne 10. července 2015 (úprava příloh 2008/98/ES) [43]

Dále pravidla určující přípustné emisní limity a nutné provozní podmínky určuje směrnice evropského parlamentu a rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění).

V neposlední řadě je nutné se při projektování spalovacích zařízení odkazovat na odpovídající referenční dokumenty o nejlepších dostupných technologiích (BREF) [21].

Do české legislativy se výše zmíněná evropská legislativa promítá následujícími zákony a vyhláškami:

- Zákon o odpadech č. 541/2020 Sb. [44]
- Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [32]
- Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší [45]

Dle legislativně zakotvené hierarchie nakládání s odpady je nepřipustné spalovat či energeticky využívat odpady, u kterých je možné provést materiálové znovuvyužití.

Odpady lze dle zákona 541/2020Sb. [44] spalovat pro energetické využití pouze pokud

- a) použitý odpad nepotřebuje po vlastním zapálení ke spalování podpůrné palivo
- b) vznikající teplo se použije pro potřebu vlastní nebo dalších osob za podmínek stanovených jinými právními předpisy
- c) odpad se použije jako palivo nebo jako přídatné palivo v zařízeních na výrobu energie nebo materiálů za podmínek stanovených jinými právními předpisy
- d) splňuje podmínku vysoké energetické účinnosti dle přílohy 7 zákona 541/2020 Sb. [44]
- e) nejedná se o odpad z odděleného sběru komunálního odpadu. Výjimkou je zbytek po jejich zpracování, který splňuje podmínky tak, aby energetické využití přinášelo nejlepší výsledek z hlediska životního prostředí v souladu s hierarchií odpadového hospodářství.

Podmínka vysoké energetické účinnosti dle přílohy 7 zákona 541/2020 Sb. [44]:

$$0,65 < R_1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (4.1)$$

Kde  $E_p$  se rozumí roční množství vyrobené energie ve formě tepla nebo elektřiny. Vypočítá se tak, že se energie ve formě elektřiny vynásobí hodnotou 2,6 a teplo vyrobené pro komerční využití hodnotou 1,1 [GJ/r], tyto koeficienty odpovídají převrácené hodnotě účinnosti referenčních zdrojů daného typu energie [46][47].  $E_f$  se rozumí roční energetický vstup do systému z paliv přispívajících k výrobě páry [GJ/r].  $E_w$  se rozumí roční množství energie obsažené ve zpracovávaných odpadech vypočítané za použití nižší čisté výhřevnosti odpadů [GJ/r].  $E_i$  se rozumí roční dodaná energie bez  $E_w$  a  $E_f$  [GJ/r]. 0,97 je činitelem energetických ztrát v důsledku vzniklého popela a vyzařování. Tento vzorec se použije v souladu s referenčním dokumentem o nejlepších dostupných technikách pro spalování odpadů.

## 4.2 Legislativně určené technické podmínky provozu

Vyhláška 415/2012 Sb. [45] stanovuje některé podmínky, které spalovací zařízení musí dodržovat.

V palivovém bunkru se kvůli možnému zápachu trvale udržuje podtlak a odsávaný vzduch se používá jako vzduch spalovací. Během odstávek je tento vzduch hnán do schváleného výduchu.

Konstrukce zařízení tepelně zpracovávající odpad se konstruuje a provozuje tak, aby bylo splněno následující:

1. Ve spalovnách odpadů je třeba zajistit dostatečnou dobu zadržky odpadu v ohništi tak, aby došlo k dokonalému zplynění a vyhoření paliva a aby struska a popel obsahovaly méně než 3 % celkového organického uhlíku, nebo aby ztráta žíháním byla menší než 5 % hmotnosti suchého materiálu
2. Spaliny musí mít za posledním přívodem spalovacího vzduchu zajištěné po celém průtočném průřezu teplotu alespoň 850 °C měřených v blízkosti vnitřní stěny po dobu alespoň 2 sekundy a to i za nepříznivých podmínek. Při spalování nebezpečných odpadů s obsahem organických sloučenin chloru vyjádřených jako chlor vyšším, než 1 %, je pak tato teplota určena jako 1100 °C, taktéž při zadržení alespoň 2 sekundy.
3. Nejméně jeden pomocný hořák na spalovací komoru, spalující palivo o nejvýše stejných emisích, jaké produkuje spalování plynového oleje, zkapalněného plynu nebo zemního plynu se automaticky aktivuje v následujících případech:
  - a. Během uvádění do provozu a odstavování, aby byla zajištěná dostatečná teplota pro vyhoření veškerého dávkovaného odpadu.
  - b. Při poklesu teploty spalin pod předepsaných 850 °C, resp. 1100 °C za posledním přívodem spalovacího vzduchu.
- a) Při najíždění, odstavování, poklesu teploty pod hodnotu stanovenou výše, nebo překročení některého ze specifických emisních limitů se automaticky uzavře přívod paliva do spalovacího prostoru.

### 4.3 Technické normy

Relevantní normou, na kterou se lze ve spojitosti s touto prací odkazovat je ČSN 06 3090 zpracovávající definice a metodiku bilancí spalovacích pecí na zneškodnění odpadů [7].

Bezpečnostní požadavky na spalovací zařízení a manipulaci s palivy shrnuje norma ČSN EN 746-2 [48].

Norma ČSN 07 0010 [49] udává doporučené parní výkony kotlů, na které je vhodné dimenzovat řešené ohniště.

Dimenzování izolace komory je navrženo dle požadavků na povrchovou teplotu dle ČSN 07 0620 [50].

## 4.4 Emisní limity

Ačkoli se musí předpokládat jako součást provozu i linka pro čištění spalin, je třeba na množství produkovaných škodlivin dbát již při návrhu samotného spalovacího zařízení. Například emise NO<sub>x</sub>, či CO lze výrazně ovlivnit správně nastavenými podmínkami ve spalovací komoře [2, 34] .

Emisní limity jsou dány vyhláškou 415/2012 Sb. [45] dle druhu spalovacího zařízení a paliva<sup>8</sup>. Jsou určeny pro většinu nežádoucích plynných a pevných emisí obsažených ve spalinách. Jejich číselné hodnoty jsou pro jednotlivá paliva a směsi paliv relevantní pro tuto práci rozepsány v následujících podkapitolách.

### 4.4.1 Podmínky provozu pro stacionární zdroje tepelně zpracovávající biomasu

Přílohy vyhlášky 415/2012 Sb. [45] definují specifické emisní limity spalovacích zdrojů energie v závislosti na jejich druhu, palivu, výkonu a datu zprovoznění. Pro relevantní zdroj používající jako palivo pouze biomasu, tedy případ, že by navrhovaný rošt sloužil v zařízení spalujícím pouze tento druh paliva jsou specifické emisní limity následující:

Tabulka 1: Specifické emisní limity pro zařízení spalující biomasu [45]

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg/Nm <sup>3</sup> ]											
	> 0,3 až < 1 MW				1-5 MW				> 5-50 MW			
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL	CO
Pevné palivo s výjimkou biomasy	-	600	100	400	400	500	50	500	400	300	20 <sup>4</sup>	300
Pevné palivo - biomasa	-	600	100	400	133 <sup>2</sup>	333	33	500	133 <sup>2</sup>	200	13	300 <sup>1</sup>

- 1) Platí v případě spalování výlisků z biomasy. Pro spalování ostatních druhů biomasy platí emisní limit 500 mg/m<sup>3</sup>.
- 2) Emisní limit neplatí pro spalování výlučně dřevní biomasy
- 3) Pokud provozovatel prokáže, že nelze této hodnoty z technických důvodů dosáhnout použitím nízkoemisních hořáků, platí specifický emisní limit 200 mg/m<sup>3</sup>.
- 4) V případě spalovacích stacionárních zdrojů o celkovém jmenovitém tepelném příkonu do 20 MW včetně platí emisní limit 30 mg/m<sup>3</sup>.

<sup>8</sup> Příslušné úřady státní správy mohou nařídít pro zdroj znečištění přísnější specifické emisní limity, než vyžaduje legislativa

#### 4.4.2 Podmínky provozu pro stacionární zdroje tepelně zpracovávající odpad

Podmínky pro zařízení spalující odpad jsou do české legislativy implementovány z legislativy evropské. Níže uvedené specifické emisní limity jsou konkrétně převzaty ze směrnice 2010/75/EU o průmyslových emisích [51].

Jelikož v navrhovaném zařízení bude jako palivo figurovat odpad, je třeba brát v potaz emisní limity pro tepelné zpracování odpadu. Dle přílohy 4 vyhlášky 415/2012 Sb. [45] jsou specifické emisní limity pro tato zařízení určeny následovně:

Emisní limity pro tepelné zpracování odpadu jsou vztaženy k celkové jmenovité kapacitě a na normální stavové podmínky (273,15 K a 101,3 kPa) a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 11 %. V případě jednorázového měření emisí látek uvedených v tabulce 3 se za emisní limit považují hodnoty denních průměrů.

Tabulka 2: Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně kontinuálním měřením [45]

Látka	Emisní limit <sup>1</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]			
	Denní průměr	Půlhodinové průměry		10 min. průměr
		97 %	100 %	
TZL	10	10	30	-
NO <sub>x</sub>	200	200	400	-
SO <sub>2</sub>	50	50	200	-
TOC	10	10	20	-
HCl	10	10	60	-
HF	1	2	4	-
CO	50	-	100	150

- 1) V případě poruchy nesmí být za žádných okolností překročeny specifické emisní limity pro celkový organický uhlík a oxid uhelnatý stanovené podle této tabulky a koncentrace tuhých znečišťujících látek 150 mg/m<sup>3</sup>, vyjádřené jako průměrné půlhodinové hodnoty.

Tabulka 3: Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně jednorázovým měřením [45]

Znečišťující látky	Emisní limit
Cd+Tl a jejich sloučeniny	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>
Hg a její sloučeniny	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V a jejich sloučeniny	0,5 mg/Nm <sup>3</sup>
PCDD/F	0,1 ng TEQ/Nm <sup>3</sup>

#### 4.4.3 Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje ke spalování více druhů paliv

Při spoluspalování více druhů paliv v jednom zařízení je dle části 3 přílohy 1 vyhlášky 415/2012 Sb. [45] nutné stanovovat emisní limity tak, že se určí specifické emisní limity odpovídající spalování každé složky palivové směsi zvlášť v zařízení o jmenovitém tepelném příkonu shodném se jmenovitým tepelným příkonem spoluspalovacího zařízení.

Hledaným specifickým emisním limitem je pak součet vážených hodnot specifických emisních limitů pro jednotlivé složky palivového mixu. Váha jednotlivých sčítanců je dána podílem tepelného příkonu dodaného odpovídající složkou paliva a celkového tepelného příkonu směsi.

Případ, kdy je jednou ze složek spalované směsi paliv odpad je zpracován zvlášť v další kapitole.

#### 4.4.4 Podmínky provozu pro stacionární zdroje tepelně zpracovávající odpad spolu s jiným palivem

Při spoluspalování odpadu s jiným palivem je třeba se odkazovat na bod 2.2 části 1 přílohy 4 vyhlášky 415/2012 Sb. [45]

Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje jsou vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky, suchý plyn, pro pevná paliva jsou vztaženy k vypočtenému referenčnímu obsahu kyslíku.

Emisní limity stanovené jako denní průměry pro TZL, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, TOC, HCl a HF pro tepelné zpracování odpadu společně s palivem se vypočtou podle následujícího vzorce:

$$C = \frac{(V_{odpad} \cdot C_{odpad}) + (V_{proc} \cdot C_{proc})}{V_{odpad} + V_{proc}} \quad (4.2)$$

Tabulka 4: Vysvětlivky k proměnným ve vzorci 4.2

---

<b>V<sub>odpad</sub></b>	Objem spalin produkovaných pouze odpadem. Stanoveno pro odpad s nejnižší výhřevností uvedený v povolení a přepočteno na normální podmínky. V případě, že výhřevnost spalovaného nebezpečného odpadu je menší, než 10 % celkového produkovaného tepla ve spalovacím zařízení, bude V <sub>odpad</sub> spočteno pro množství odpadu, které by pokrylo těchto 10 % produkce
<b>C<sub>odpad</sub></b>	Emisní limity stanovené v bodě 1 přílohy 4 vyhlášky 415/2012/Sb. (specifické limity pro spalovny odpadů; tabulka 7 této zprávy)
<b>V<sub>proc</sub></b>	Objem celkových spalin přepočtený na normální stavové podmínky a referenční hladinu kyslíku.
<b>C<sub>proc</sub></b>	Emisní limity v podobě uvedené v následující tabulce.
<b>C</b>	Vypočtený emisní limit při referenčním obsahu kyslíku a normálních podmínkách.

---

Tabulka 5: Hodnoty  $C_{proc}$  pro spalovací stacionární zdroje [45]

Druh paliva	Hodnoty $C_{proc}$ [ $mg \cdot m^{-3}$ ]											
	< 50 MW			50-100 MW			> 100-300 MW			> 300 MW		
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL
Pevné palivo obecně	-	-	50	400	300	20	200	200	20	150	150	10
Rašelina	-	-	50	300	250	20	300	200	20	150	150	20
Biomasa podle § 2 písm. a)	-	-	50	200	250	20	200	200	20	150	150	20
Kapalné palivo	-	-	50	350	300	20	200	150	20	150	100	10

## 5 ZADÁNÍ ŘEŠENÉHO PŘÍPADU – PALIVOVÝ MIX

### 5.1 Návrhový výpočet zařízení pro zvolenou kombinaci paliv

Výpočetní aparát přiložený k této práci je dále v souladu s předem vytyčenými cíly použit na návrh ukázkového zařízení s vhodně zvolenými parametry. Jedná se tedy o bližší studii jednoho možného případu, nicméně stejným způsobem je možné nástroje zahrnuté v této práci využít na bezpočet dalších.

Následující kapitola 6 obsahuje výpis z výpočtů strukturovaný tak, aby jej bylo možné sledovat a případně kontrolovat.

Po provedení výpočtů je daná varianta zpracována do projekční výkresové dokumentace obsažené v příloze 1 (výkresová dokumentace).

#### 5.1.1 Volené parametry

Tabulka 6: Parametry uvažované při návrhovém výpočtu zařízení pro volenou palivovou směs

Parametr	Hodnota	Jednotka	
Teploty:	Spalovací vzduch	20	°C
	Výstup spalin z kotle	140	°C
	Recirkulace spalin	140	°C
Vzduch:	Přebytek	1,5	-
	Recirkulace spalin	10	%
	Relativní vlhkost vzduchu	50	%
Palivo:	Druh	TAP + dřevní štěpka (40/60)	-
	Množství	(závislé na volbě par. výkonu)	kg/h
	Podíl spalitelné síry	100	%
	Zástřik kanálu	Ne	kg/kg <sub>pal</sub>
Kotel:	Parní výkon	4	t/h
Rošt:	Sklon roštu	15	°
	Plošné tepelné zatížení	0,9	MW/m <sup>2</sup>
	Vzduchové zóny	5	-

Jako volená palivová směs poslouží například kombinace TAP briket a dřevní biomasy v poměru 40/60 % <sup>9</sup>.

Tabulka 7: Výsledná palivová směs při ukázkovém výpočtu

Palivová směs	Celková složka	Podíl [hm.%]	
<b>Palivo:</b> [hm.%]	Hořlavina	64,17	
	Vlhkost	31,40	
	Popelovina	4,43	
<b>Hořlavina:</b> [hm.%]	C	52,91	
	N	0,11	
	S	0,36	
	H	6,47	
	O	40,09	
	Cl	0,06	$t_A = 1038\text{ }^\circ\text{C}$

Tabulka 8: Složení dílčího paliva - dřevní štěpka

Dřevní štěpka	Celková složka	Podíl [hm.%]	Ibler [52]
<b>Palivo:</b> [hm.%]	Hořlavina	49,60	
	Vlhkost	50,00	
	Popelovina	0,40	
<b>Hořlavina:</b> [hm.%]	C	52,42	
	N	0,10	
	S	0,50	
	H	6,05	
	O	40,93	
	Cl	0,00	$t_A = 1038\text{ }^\circ\text{C}$

Tabulka 9: Složení dílčího paliva - TAP

TAP - brikety	Celková složka	Podíl [hm.%]	Kolářová et al [53]
<b>Palivo:</b> [hm.%]	Hořlavina	86,03	
	Vlhkost	3,50	
	Popelovina	10,47	
<b>Hořlavina:</b> [hm.%]	C	53,65	
	N	0,12	
	S	0,14	
	H	7,11	
	O	38,83	
	Cl	0,15	$t_A = 1100\text{ }^\circ\text{C}$

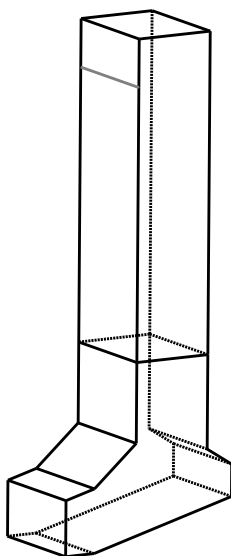
<sup>9</sup> Volba palivové směsi je ukázková pro potřeby práce; založena čistě na informovaném předpokladu, že takovou kombinaci paliv může v praxi někdo chtít spalovat

## 6 NÁVRH KOMORY A ROŠTU PRO SPALOVÁNÍ PALIVOVÉHO MIXU

Spalovací komora je navržena, vypočtena a dále konstruována jako roštové ohniště s posuvným roštem, středovým tokem spalin, klenbou fungující jako zápalné radiační zrcadlo, zónováním primárního vzduchu, recirkulací spalin a vertikální vychlazovanou dohořivací komorou s membránovou stěnou.

Základní geometrie je podrobena právě požadavku na středoproudý odvod spalin a odrazovou funkci klenby. Úhel spádu roviny roštu je založen na řešení současných ohnišť s posuvnými rošty.

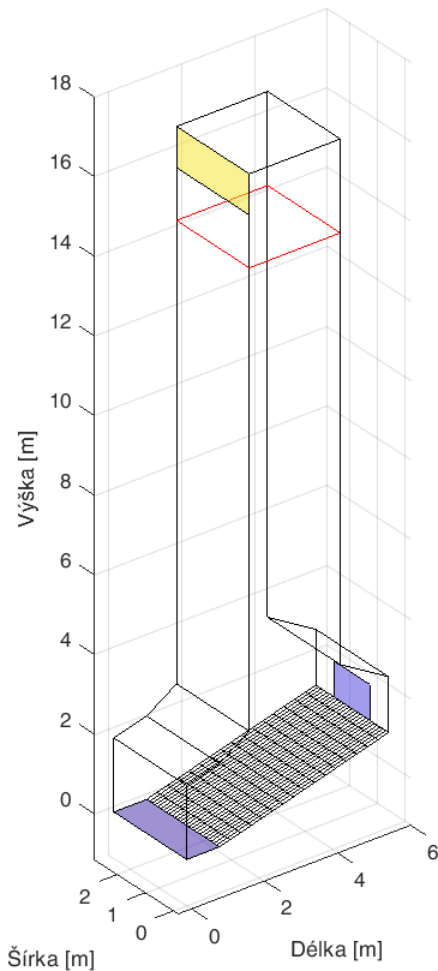
*Obrázek 8* zobrazuje koncepční geometrii, jejíž rozměry jsou přizpůsobovány příslušným požadavkům na volený palivový mix, počet vzduchových zón, reálný spád roviny roštu a další volené parametry, popřípadě legislativní podmínky provozu.



Obrázek 8: Koncept geometrie spalovací komory (vstup pro skript)

Veškeré míry (délkové a úhlové, počet roštnic v řadě, počet řad roštnic v ohništi apod.), specifikující blíže zařízení jsou dopočteny v následující kapitole. Z těchto výsledků poté vychází reálný návrh spalovacího zařízení.

*Obrázek 9* znázorňuje výstup z výpočtu, tedy koncepční geometrii upravenou dle požadavků předpokládaného provozu. Z tohoto výstupu se dále v konstrukční části odvozuje reálný návrh spalovacího zařízení.



Obrázek 9: Geometrie navržená přiloženým skriptem pro vybrané parametry (dosazený výpočet viz níže)

Vybarvené plochy značí materiálové vstupy a výstupy (dávkový kanál, odvod škváry a výstupní okno spalin z dohořivací komory). Mřížka na ploše roštu dělí polohy jednotlivých roštnic. Červená linka na dohořivací komoře má za úkol znázornění potřebné plochy membránové stěny k dostatečnému vychlazení produkovaných spalin (pod linkou vyzdívka, stěny nad linkou řešeny jako membránové). Prakticky jde o grafické znázornění požadovaného poměru membránové a vyzdívkové stěny ohniště.

## 6.1 Výpočtový program

### 6.1.1 Popis programu

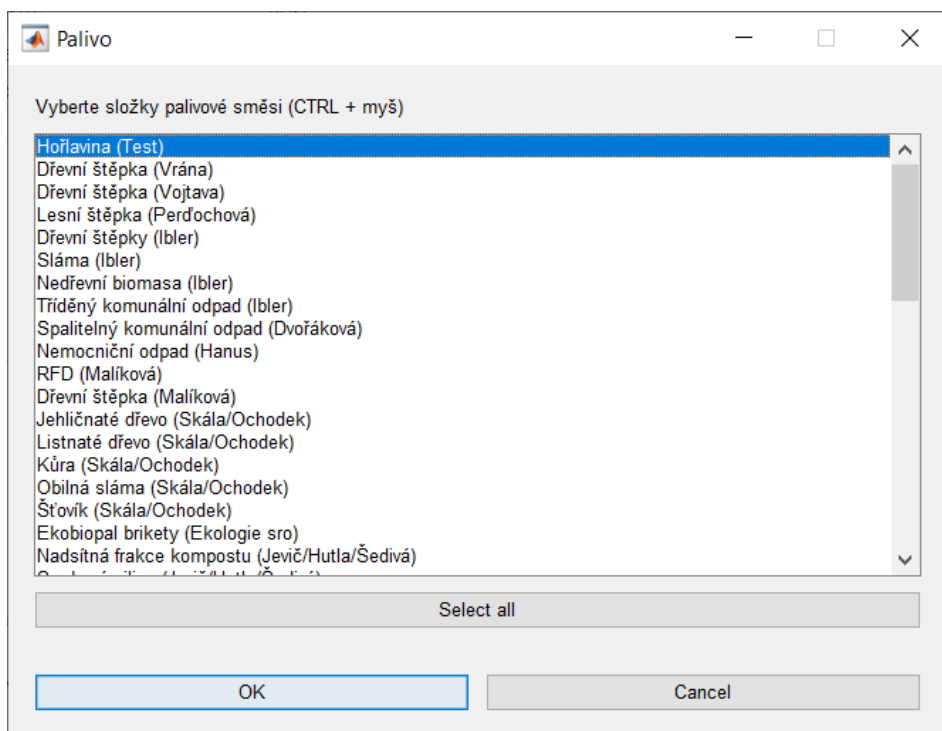
Veškeré v této práci popsané výpočty byly automatizovány s pomocí programu pro skriptovací prostředí Matlab R2020b. Verze nástroje předložená v této diplomové práci je použitelným prototypem, na němž bude autor v následujících letech budovat systém pro návrh roštových spalovacích komor.

Skript je opatřen jednoduchým uživatelským rozhraním ve formě průběžně volaných dialogových oken, která umožňují přehlednější práci při výpočtech.

Vstupem do výpočtu jsou vlastnosti palivové směsi a další volené parametry, jako je přebytek vzduchu při spalování. Jelikož složení spalované směsi bude v případě ohniště řešeného v této diplomové práci značně proměnlivé, je tento nástroj vhodný pro zjišťování, zda je navržená geometrie použitelná pro danou směs a opačně, což autorovi umožní určit chování zařízení a jeho odezvu na změnu paliva či geometrie.

Zdrojové .csv soubory s tabelovanými daty z literatury, které skrip využívá k výpočtům, obsahují mimo jiné databázi elementárního složení paliv, jejichž rozbor autor dohledal v dostupné literatuře.

Uživatelské rozhraní umožňuje do databáze nahrát elementární složení dalších paliv a tím ji rozšířit dle potřeby uživatele.



Obrázek 10: Uživatelské rozhraní pro výběr složek palivové směsi

Výstupem jsou objem spalin, teploty a další parametry, které jsou dle zvyklostí a platných norem nutné pro základní návrhový výpočet spalovacích komor a ukazatele, které pomohou uživateli při jejím konstruování. Tyto parametry jsou pro každou kombinaci vstupních parametrů z prostředí Matlab exportovány do výstupního protokolu, kde jsou přehledně k dispozici pro další využití. Protokol s výsledky pro dále řešenou ukázkovou spalovací komoru je přiložen pod označením *příloha 2*.

Samotný skript je sestaven tak, aby bylo možné se v něm zpětně orientovat. Je napsán jako jeden soubor, který řeší výpočty postupně. Pro funkci skriptu je nutné mít v připojeném adresáři přístupné databázové .csv soubory s tabelovanými hodnotami, kde je uložena převážná většina dat vstupujících do výpočtů. Zároveň vyžaduje instalaci balíčku funkcí Matlab Report Generator 5.9 pro správnou funkci části kódu generující .pdf výstupní zprávu.

Tělo skriptu je děleno do funkčních bloků, přičemž každý následující využívá výsledky výpočtů či interakce s uživatelem v blocích předchozích.

Zjednodušený vývojový diagram výpočtů je možné nalézt mezi přiloženými dokumenty jako *přílohu 3*.

## 6.2 Bilanční výpočty pro stanovení potřebných technologických parametrů

Všechny následující výpočty jsou provedeny zmíněným výpočetním skriptem. Význam jednotlivých značek je uveden v tabulce na konci dokumentu.

### 6.2.1 Výpočet: výhřevnost

Spalné teplo TAP:

$$HHV_h = 341 \cdot C_h + 1322 \cdot H_h + 68,5 \cdot S_h - 120 \cdot (O_h - N_h) \left[ \frac{kJ}{kg_{hořlaviny}} \right] \quad (6.1)$$

$$HHV_h = 341 \cdot 53,65 + 1322 \cdot 7,11 + 68,5 \cdot 0,14 - 120 \cdot (38,83 - 0,12)$$

$$HHV_h = 23058 \frac{kJ}{kg_{hořlaviny}}$$

Výhřevnost TAP se pak ze spalného tepla dopočte pro hořlavinu (užívá se hodnota při 25 °C, kdy  $r_{H_2O} = 2442 \frac{kJ}{kg}$ ) [54].

$$LHV_h = HHV_h - \left( H_h + \frac{Cl_h}{35,453} + \frac{F_h}{18,9944} \right) \cdot 8,938 \cdot r_{H_2O} \left[ \frac{kJ}{kg_{hořlaviny}} \right] \quad (6.2)$$

$$LHV_h = 23058 - \left(7,11 + \frac{015}{35,453} + \frac{0}{18,9944}\right) \cdot 8,938 \cdot 2442$$

$$LHV_h = 21508 \frac{kJ}{kg_{hořlaviny}}$$

Pro palivo TAP:

$$LHV = LHV_h \cdot B_p - W_p \cdot r_{H_2O} \left[ \frac{kJ}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.3)$$

$$LHV = 21508 \cdot 0,86 - 0,04 \cdot 2442$$

$$LHV = 18496 \frac{kJ}{kg_{paliva}}$$

kde  $B_p$  značí hmotnostní zlomek hořlaviny v palivu,  $W_p$  hmotnostní zlomek vlhkosti v palivu a  $r_{H_2O}$  výparné teplo vody (užívá se hodnota při 25 °C, kdy  $r_{H_2O} = 2442 \frac{kJ}{kg}$ ) [54].

Pro štěpku je dosazeno do stejných vzorců.

Celková palivová směs (TAP i štěpka):

$$LHV_C = LHV_{TAP} \cdot 0,4 + LHV_{štěpka} \cdot 0,6 \quad (6.4)$$

$$LHV_C = 12549 \frac{kJ}{kg_{paliva}}$$

Není-li znám elementární rozbor paliva, ale pouze jeho obsah vody  $W$  a popelovin  $A$  a je kalorimetricky určena jeho výhřevnost, je v praxi používáno pro výpočty náhradní palivo u kterého se dá předpokládat obdobné složení hořlaviny. Pro výpočty s uhlím to bude jiné známé uhlí ze stejného uhelného revíru, pro odpady typické složení pro druh, lokalitu apod. Pro náhradní palivo se spočte výhřevnost podle vhodného vzorce, tedy například výše uvedeným postupem a pokud bude rozdíl naměřené a spočtené hodnoty dostatečně malý ( $\pm 200$  kJ/kg), mohou být další výpočty provedeny s tímto složením [18].

## 6.2.2 Výpočet: spalovací vzduch

Korekce vodíku na halogenvodíky:

$$H_{h,korig} = H_h - \left( \frac{Cl_h}{100} \cdot \frac{1,0079}{35,453} + \frac{F_h}{100} \cdot \frac{1,0079}{18,998} \right) \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (6.5)$$

$$H_{h,korig} = 6,47 - \left( \frac{0,06}{100} \cdot \frac{1,0079}{35,453} + \frac{0}{100} \cdot \frac{1,0079}{18,998} \right)$$

$$H_{h,korig} = 4,1545 \text{ hm. \%}$$

Stechiometrické (minimální) množství kyslíku:

$$O_{2,air,min} = \frac{22,414}{100} \left( \frac{C^r}{12,011} + \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{S_{spal}^r}{32,065} - \frac{O_2^r}{31,998} \right) \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.6)$$

$$O_{2,air,min} = \frac{22,414}{100} \left( \frac{52,91}{12,011} + \frac{4,1545}{4,032} + \frac{0,36}{32,065} - \frac{40,09}{31,998} \right)$$

$$O_{2,air,min} = 0,6860 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Minimální množství suchého vzduchu:

$$O_{air,min}^S = \frac{100}{O_{2,air}^S} O_{2,air,min} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.7)$$

$$O_{air,min}^S = \frac{100}{20,95} 0,6860$$

$$O_{air,min}^S = 3,2743 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Min. množství vlhkého vzduchu (koeficient  $f$  interpolován z tabulkových hodnot):

$$O_{air,min} = f \cdot O_{air,min}^S = \left( 1 + \varphi \frac{p''}{p_c - p''} \right) \cdot O_{air,min}^S \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.8)$$

$$O_{air,min} = 1,0120 \cdot 3,2743$$

$$O_{air,min} = 3,3136 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Tabulka 10: Data pro interpolaci funkce  $f$ , pro přepočítání suchého na vlhký vzduch [25]

$t$ [°C]	0	10	20	30	40	50	60
$\frac{p''}{p_c - p''}$	0,006	0,012	0,024	0,044	0,080	0,141	0,250

Skutečné množství vzduchu:

$$O_{air} = \alpha \cdot O_{air,min} \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \quad (6.9)$$

$$O_{air} = 1,5 \cdot 3,3136$$

$$O_{air} = 4,9704 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Skutečné množství vzduchu při reálných podmínkách:

$$O_{air,real} = O_{air} \cdot \frac{\tau_{vzduch} + 273,15}{273,15} \frac{m^3}{kg_{paliva}} \quad (6.10)$$

$$O_{air,real} = 4,9704 \cdot \frac{20 + 273,15}{273,15}$$

$$O_{air,real} = 5,3344 \frac{m^3}{kg_{paliva}}$$

### 6.2.3 Výpočet: spaliny

CO<sub>2</sub> ve spalinách:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{C^r}{12,011} + \frac{CO_{2,air}^S}{100} \cdot O_{air,min}^S \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.11)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{52,91}{12,011} + \frac{3,00}{100} \cdot 3,2743$$

$$O_{CO_2} = 0,6303 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

SO<sub>2</sub> ve spalinách:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S_{spal}^r}{32,065} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.12)$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,36}{32,065}$$

$$O_{SO_2} = 0,0016 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

N<sub>2</sub> ve spalinách:

$$O_{N_2} = \frac{22,41}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + \frac{N_{2,air}^S}{100} \cdot O_{air,min}^S \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.13)$$

$$O_{N_2} = \frac{22,41}{100} \cdot \frac{0,11}{28,016} + \frac{78,08}{100} \cdot 3,2743$$

$$O_{N_2} = 2,5572 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Ar ve spalinách:

$$O_{Ar} = \frac{Ar_{air}^S}{100} \cdot O_{air,min}^S \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.14)$$

$$O_{Ar} = \frac{0,94}{100} \cdot 3,2743$$

$$O_{Ar} = 0,0308 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Suché spaliny – minimální množství:

$$O_{sp,min}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.15)$$

$$O_{sp,min}^S = 0,6303 + 0,0016 + 2,5572 + 0,0308$$

$$O_{sp,min}^S = 3,2219 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Suché spaliny – minimální množství se započtením recirkulace:

$$O_{sp,min,rec}^S = O_{sp,min}^S \cdot \left( 1 + \frac{\%rec}{100} \right) \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \quad (6.16)$$

$$O_{sp,min,rec}^S = 3,2219 \cdot \left( 1 + \frac{10}{100} \right)$$

$$O_{sp,min,rec}^S = 3,4787 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Minimální objem vodní páry ve spalinách:

$$O_{H_2O} = O_{H_2O}^H + O_{H_2O}^W + O_{H_2O,min}^{Air} + O_{H_2O}^{Trysk} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.17)$$

$$O_{H_2O} = \frac{44,83}{100} \cdot \frac{H_{korig}^r}{4,032} + \frac{22,41}{100} \cdot \frac{W^r}{18,015} + (f - 1) \cdot O_{air,min}^S + O_{H_2O}^{Trysk} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right]$$

$$O_{H_2O} = \frac{44,83}{100} \cdot \frac{4,1545}{4,032} + \frac{22,41}{100} \cdot \frac{31,40}{18,015} + (1,0120 - 1) \cdot 3,2743 + 0$$

$$O_{H_2O} = 0,8918 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Vlhké spaliny – minimální množství:

$$O_{sp,min} = O_{sp,min,rec}^S + O_{H_2O} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.18)$$

$$O_{sp,min} = 3,4787 + 0,8918$$

$$O_{sp,min} = 4,3706 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Skutečné množství vlhkých spalin:

$$O_{sp} = O_{sp,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{air,min} \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.19)$$

$$O_{sp} = 4,3706 + (1,5 - 1) \cdot 3,3136$$

$$O_{sp} = 6,0274 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$

Objemový zlomek tříatomových plynů:

$$r_{sp} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{H_2O}}{O_{spal}} \text{ [obj. zlomek]} \quad (6.20)$$

$$r_{sp} = \frac{0,6304 + 0,0017 + 0,8918}{6,0274}$$

$$r_{sp} = 0,2528$$

Koncentrace popílku ve spalinách:

$$\mu = \frac{10A^r}{O_{spal}} \cdot \frac{X_u}{100} \left[ \frac{g}{m_N^3} \right] \quad (6.21)$$

$$\mu = \frac{10 \cdot 4,428}{6,0274} \cdot \frac{25}{100}$$

$$\mu = 1,8366 \frac{g}{m_N^3}$$

#### 6.2.4 Výpočet: teoretická a adiabatická teplota spalin

Jsou vytvořeny interpolační funkce závislosti teplota – entalpie jednotlivých složek spalin. Detaily zde není třeba rozepisovat. Tabulková závislost I-t viz níže.

Pro různé teploty v intervalu 0 – 2000 °C byly vyčísleny následující rovnice.

Entalpie minimálního množství vzduchu:

$$I_{vzd,min}^t = O_{vzd,min}^s \cdot i_{vzd}^t + O_{H_2O,min}^V \cdot i_{H_2O}^t \left[ \frac{kJ}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.22)$$

Entalpie stechiometrického množství spalin:

$$I_{spal,min}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t \left[ \frac{kJ}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.23)$$

Entalpie spalin při teplotě  $t$  a přebytku spalovacího vzduchu  $\alpha$ :

$$I_{spal}^{t,\alpha} = I_{spal,min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{vzd,min}^t \left[ \frac{kJ}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.24)$$

Tabulka 23: Entalpie spalovacího vzduchu a vlhkých spalin při různých hodnotách přebytku vzduchu v závislosti na teplotě

Teplota °C	Vzduch [kJ/mN <sup>3</sup> ]	$\alpha = 1$ [kJ/mN <sup>3</sup> ]	$\alpha = 1,1$ [kJ/mN <sup>3</sup> ]	$\alpha = 1,2$ [kJ/mN <sup>3</sup> ]	$\alpha = 1,3$ [kJ/mN <sup>3</sup> ]	$\alpha = 1,4$ [kJ/mN <sup>3</sup> ]	$\alpha = 1,5$ [kJ/mN <sup>3</sup> ]	$\alpha = 2$ [kJ/mN <sup>3</sup> ]	$\alpha$ vol. [kJ/mN <sup>3</sup> ]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	106.64	153.48	164.14	174.81	185.47	196.13	206.80	260.12	206.80
100	433.19	609.21	652.53	695.85	739.17	782.48	825.80	1042.40	825.80
200	871.63	1234.94	1322.10	1409.26	1496.42	1583.59	1670.75	2106.56	1670.75
300	1317.92	1878.37	2010.16	2141.95	2273.74	2405.54	2537.33	3196.29	2537.33
400	1773.71	2540.29	2717.66	2895.03	3072.40	3249.77	3427.14	4314.00	3427.14
500	2207.23	3220.66	3441.38	3662.10	3882.82	4103.55	4324.27	5427.88	4324.27
600	2716.38	3919.65	4191.28	4462.92	4734.56	5006.20	5277.84	6636.03	5277.84
700	3202.62	4635.54	4955.80	5276.07	5596.33	5916.59	6236.85	7838.17	6236.85
800	3696.72	5367.99	5737.67	6107.34	6477.01	6846.68	7216.35	9064.71	7216.35
900	4200.97	6113.89	6533.99	6954.09	7374.18	7794.28	8214.38	10314.86	8214.38
1000	4711.76	6876.10	7347.28	7818.45	8289.63	8760.80	9231.98	11587.86	9231.98
1100	5229.11	7648.05	8170.96	8693.87	9216.78	9739.69	10262.60	12877.16	10262.60
1200	5749.73	8432.09	9007.07	9582.04	10157.01	10731.98	11306.96	14181.82	11306.96
1300	6273.62	9224.63	9852.00	10479.36	11106.72	11734.08	12361.44	15498.25	12361.44
1400	6800.79	10024.55	10704.63	11384.71	12064.79	12744.87	13424.95	16825.34	13424.95
1500	7334.50	10832.38	11565.83	12299.28	13032.73	13766.18	14499.63	18166.88	14499.63
1600	7868.22	11652.83	12439.65	13226.47	14013.30	14800.12	15586.94	19521.05	15586.94
1800	8945.47	13298.33	14192.88	15087.43	15981.98	16876.52	17771.07	22243.81	17771.07
2000	10035.82	14965.10	15968.68	16972.27	17975.85	18979.43	19983.01	25000.92	19983.01

Zpětnou interpolací je možné z dat v tabulce určit teoretickou a adiabatickou spalovací teplotu.

Pokud je tedy přebytek vzduchu 1,5 a entalpie předaná palivem do spalin je například 6236,85 kJ/mN<sup>3</sup>, pak je adiabatická teplota spalin 700 °C (přímo z tabulky) a teoretická teplota 916,13 °C (interpolací mezi daty v tabulce).

Při lineární interpolaci (ukázka na teoretické teplotě dle předchozího odstavce):

$$\tau = \tau_1 + (I - I_1) \frac{\tau_2 - \tau_1}{I_2 - I_1} [^{\circ}C] \quad (6.25)$$

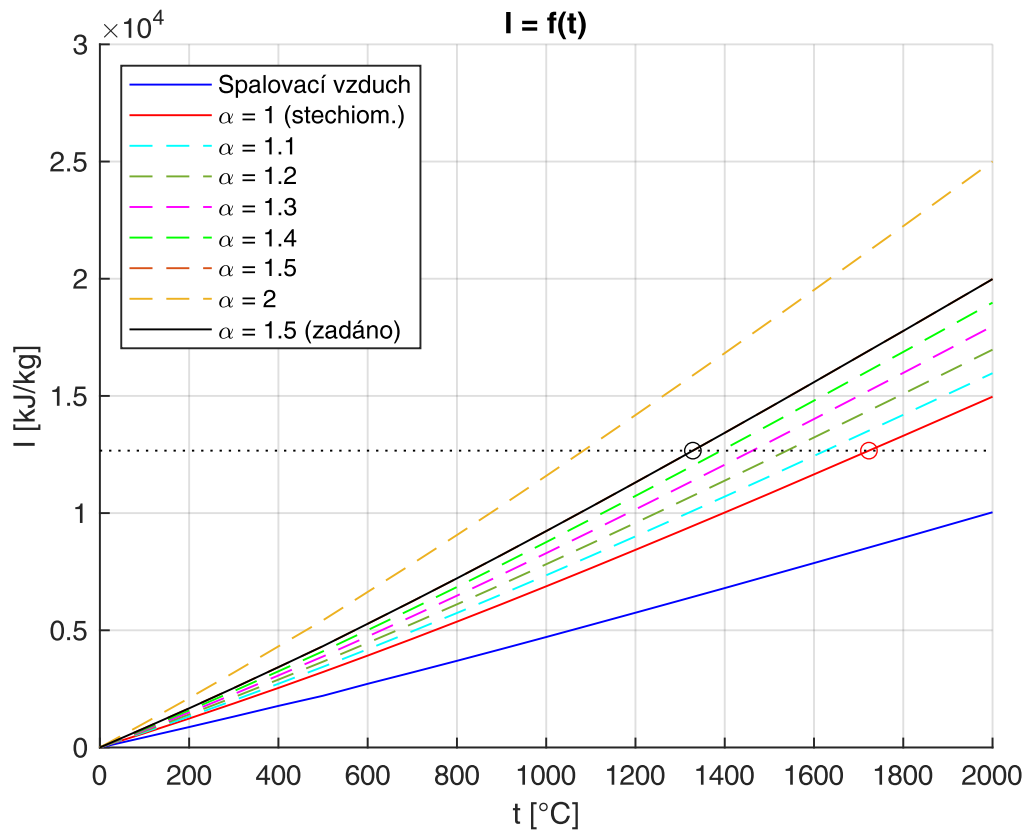
$$\tau = 900 + (6236,85 - 6113,89) \frac{1000 - 900}{6876,10 - 6113,89}$$

$$\tau = 916,13 \text{ } ^{\circ}C$$

Množství spalin při teplotě (ukázka s teplotou z předchozího odstavce):

$$O_{SP}^{700^{\circ}C} = O_{sp} \left( \frac{700 + 273,15}{273,15} \right) \left[ \frac{m_N^3}{kg_{paliva}} \right] \quad (6.26)$$

$$O_{SP}^{700^{\circ}C} = 21,4738 \frac{m_N^3}{kg_{paliva}}$$



Graf 2: I-t diagram spalnin pro počítané zařízení (průsečíky značí teoretickou a adiabatickou teplotu plamene)

Určené teploty:

$$\tau_{adiabatic} = 1328,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\tau_{theoretic} = 1723,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 6.2.5 Výpočet: ztráty při spalování

Všechny koeficienty a jejich volené hodnoty jsou založeny na literatuře.

Měrné fyzické teplo paliva:

$$i_p = \left( c_W \left( \frac{W}{100} \right) + c_A \left( \frac{100-W}{100} \right) \right) \cdot t_p \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (6.27)$$

$$i_p = \left( 4,182 \left( \frac{31,40}{100} \right) + 1,13 \left( \frac{68,6}{100} \right) \right) \cdot 20$$

$$i_p = 2279,2 \frac{J}{kg}$$

Stanovení ztrát slouží k vyčíslení účinnosti. K jejímu vyčíslení se dá přistupovat dvěma způsoby, přímým a nepřímým [3]. Přímá metoda počítá s dodanou a vyrobenou energií, zatímco nepřímá vyžaduje vyčíslení jednotlivých složek ztrát.<sup>10</sup>

Výpočtová metodika jednotlivých dílčích ztrát je uvedena v ČSN 07 0305 [55], popřípadě v ČSN EN 12952-15 [56], kde je uvedena podobná metodika se zaměřitelnými výsledky.

Nepřímá metoda výpočtu účinnosti využívá množství tabulkových hodnot typických pro dané druhy ohnišť a daná paliva. Hodnoty potřebné pro přesné výpočty není možné pro všechny autorem uvažované kombinace paliv získat, proto je využito odborného odhadu. Odhady jsou založené na jisté podobnosti směsí paliv z komunálních odpadů a biomasy, a nízko kvalitních hnědých uhlí (výhřevnost, složení) [25, 57].

Ztráta mechanickým nedopalem:

$$Z_{c1} = \frac{C_1}{100-C_1} \cdot \frac{X_1}{100} \cdot \frac{A}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} [\%] \quad (\text{tuhé zbytky z ohniště}) \quad (6.28)$$

$$Z_{c1} = \frac{9}{100-9} \cdot \frac{65}{100} \cdot \frac{10,47}{12549} \cdot 32600$$

$$Z_{c2} = \frac{C_2}{100-C_2} \cdot \frac{X_2}{100} \cdot \frac{A}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} [\%] \quad (\text{propad}) \quad (6.29)$$

$$Z_{c2} = \frac{30}{100-30} \cdot \frac{10}{100} \cdot \frac{10,47}{12549} \cdot 32600$$

$$Z_{c3} = \frac{C_3}{100-C_3} \cdot \frac{X_3}{100} \cdot \frac{A}{Q_p^p} \cdot Q_{ci} [\%] \quad (\text{úlet}) \quad (6.30)$$

$$Z_{c3} = \frac{25}{100-25} \cdot \frac{25}{100} \cdot \frac{10,47}{12549} \cdot 32600$$

$$\Sigma Z_C = Z_{c1} + Z_{c2} + Z_{c3} = 1,7486 + 1,1657 + 2,2667 = 5,6991 \% \quad (6.31)$$

Značka  $C_i$  zde symbolizuje hmotnostní procentuální podíl zbytkové hořlaviny v daném typu tuhých zbytků,  $X_i$  potom procentuální podíl popela daného druhu vůči své celkové váze.  $A$  [hm. %] zastupuje popeloviny v palivové směsi,  $Q_p^p$  [kJ/kg] je přiváděné využitelné teplo v palivu, tzn. výhřevnost a fyzické teplo.  $Q_{ci}$  [kJ/kg] je výhřevnost hořlaviny v daném druhu tuhých zbytků, která závisí zejména na obsahu zbytkového uhlíku [25].

---

<sup>10</sup> Přímou metodu nelze použít v návrhovém výpočtu

Pro návrhové výpočty se často používá hodnota  $Q_{ci} = 32,6 \text{ MJ/kg}$ , odpovídající předpokládatelnému průměru, neboť není možné dopředu znát skutečný podíl uhlíku v popelu. Pokud je obsah uhlíku v daném druhu popela větší, než 20 %, je vhodné  $Q_{ci}$  stanovit pro kontrolní výpočty přímo [25].

$C_i$  a  $X_i$  jsou hodnoty, které je třeba odhadovat. Hodnoty při spalování uvažovaných kombinací paliv by se teoreticky měly blížit hodnotám při spalování hnědých uhlí, tento předpoklad je v pracích spojených se spalováním směsí odpadu a biomasy rozšířený [25, 57, 58].

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků:

$$Z_{f1} = \frac{X_1}{100 - C_1} \cdot \frac{A}{Q_p^p} \cdot c_1 \cdot t_1 \text{ [%]} \quad (\text{tuhé zbytky z ohniště}) \quad (6.32)$$

$$Z_{f1} = \frac{65}{100 - 9} \cdot \frac{10,47}{12549} \cdot 0,93 \cdot 600$$

$$Z_{f2} = \frac{X_2}{100 - C_2} \cdot \frac{A}{Q_p^p} \cdot c_2 \cdot t_2 \text{ [%]} \quad (\text{propad}) \quad (6.33)$$

$$Z_{f2} = \frac{10}{100 - 30} \cdot \frac{10,47}{12549} \cdot 0,882 \cdot 300$$

$$Z_{f3} = \frac{X_3}{100 - C_3} \cdot \frac{A}{Q_p^p} \cdot c_3 \cdot t_3 \text{ [%]} \quad (\text{úlet}) \quad (6.34)$$

$$Z_{f3} = \frac{25}{100 - 25} \cdot \frac{10,47}{12549} \cdot 0,8412 \cdot 180$$

$$\sum Z_F = Z_{f1} + Z_{f2} + Z_{f3} = 0,3326 + 0,0315 + 0,0421 = 0,4062 \text{ \%} \quad (6.35)$$

Ve vzorci  $c_i \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$  značí měrnou tepelnou kapacitu tuhých zbytků a  $t_i \text{ [}^\circ\text{C]}$  jejich odhadovanou teplotu. Měrná tepelná kapacita je závislá na teplotě a byla při výpočtech interpolována z dat dostupných v literatuře [25, 30] pro odpovídající hodnoty  $t_i$ .

Z výsledků výpočtů je patrné, že ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků činí zhruba 1 % a vliv na odhad účinnosti je relativně malý. Proto je možné zde použít střední hodnotu  $c_i$  a méně přesné odhady teplot bez výrazného ovlivnění výsledků.

Ztráta chemickým nedopalem je odhadnuta přímo.

$$Z_{CO} = 0,1 \text{ \%} \quad (6.36)$$

Ztráta citelným teplem spalin (potřebné entalpie interpolací ze známých dat o I-t závislosti spalin):

$$Z_K = (100 - Z_C) \cdot \frac{I_{SP} - I_{VZ}}{Q_p} [\%] \quad (6.37)$$

$$Z_K = (100 - 5,6991) \cdot \frac{1160,9 - 85,19}{12549}$$

$$Z_K = 8,0836 \%$$

kde  $I_{SP} [kJ/m^3]$  je entalpie spalin proudících do komína. Při výpočtech v této práci byla její velikost určena z interpolačních funkcí vytvořených pro I-t diagram spalin (viz popis výpočetního skriptu).  $I_{VZ} [kJ/m^3]$  je pak entalpií přiváděného spalovacího vzduchu, její velikost byla při výpočtech v rámci této práce vypočtena obdobně, jako entalpie spalin.

Ztráta sdílením tepla do okolí a účinnost (jedná se iterační výpočet, zde jsou proto uvedeny hodnoty posledního cyklu):

$$Q_N = \frac{LHV}{1000} \cdot M_p [MW] \quad (\text{max. použitelný výkon}) \quad (6.38)$$

$$Q_N = \frac{12549}{1000} \cdot 0,9073$$

$$Q_N = 11,3863 MW$$

$$Q_{RC} = Q_N^{0,7} \cdot C [MW] \quad (\text{ztrátový výkon}) \quad (6.39)$$

$$Q_{RC} = 11,3863^{0,7} \cdot 0,0315$$

$$Q_{RC} = 0,1729 MW$$

kde  $Q_{RC} [MW]$  je ztrátový výkon charakterizovaný exponentem  $A$  a koeficientem  $B$ . Z literatury [25, 57] jsou jejich hodnoty voleny  $A = 0,7$  a  $B = 0,0315$ .

$$Z_S = \frac{Q_{RC}}{Q_N} \cdot 100 [\%] \quad (\text{ztráta sdílením do okolí}) \quad (6.40)$$

$$Z_S = \frac{0,1729}{11,3863} \cdot 100$$

$$Z_S = 1,5184 \%$$

$$\eta = 100 - \sum Z_i = 100 - Z_C - Z_F - Z_{CO} - Z_K - Z_S [\%] \quad (6.41)$$

$$\eta = 100 - 5,1810 - 0,4062 - 0,1 - 8,1280 - 1,5184$$

$$\eta = \mathbf{84,67 \%}$$

$$M_p = \frac{Q_v}{Q_{pp} \cdot \frac{\eta}{100}} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (\text{množství paliva}) \quad (6.42)$$

$$M_p = \frac{9640}{12549 \cdot \frac{84,67}{100}}$$

$$M_p = 0,9073 \frac{kg}{s}$$

Výrobní teplo páry je odvozené od jmenovitého parního výkonu kotle, který za spalovacím zařízením následuje. Parní kotle, potažmo tedy i jejich ohniště se obvykle konstruují pro řadu parních výkonů dle ČSN 07 0010 [19, 25, 30, 49].

$$M_{pv} = M_p \left( 1 - \frac{Z_c}{100} \right) \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (\text{množství spáleného paliva}) \quad (6.43)$$

$$M_{pv} = 0,9073 \left( 1 - \frac{5,1810}{100} \right)$$

$$M_{pv} = 0,8603 \frac{kg}{s}$$

## 6.3 Rozměry spalovací komory pro danou zpracovatelskou kapacitu

### 6.3.1 Výpočet: rozměry roštu

Plocha roštu:

$$S_r = \frac{M_p \cdot LHV}{q_s} [m^2] \quad (6.44)$$

$$S_r = \frac{0,9073 \cdot 12549}{0,9}$$

$$S_r = 12,65 m^2$$

Ve vzorci vystupující  $M_p \left[ \frac{kg}{s} \right]$  je dříve spočtený tok paliva na rošt. Počítá se s hodnotou skutečně přivedeného paliva, ačkoli tepelné zatížení vzniká pouze z jeho skutečně spálené části  $M_{pv}$  – vzniklá chyba je však v porovnání s ostatními odchylkami výpočtů od reality zanedbatelná a neuvažuje se.

Hodnota plošného tepelného zatížení  $q_s \left[ \frac{MW}{m^2} \right]$  je v praxi volena z doporučeného empirického intervalu pro daný typ roštu. Pro posuvné rošty to bývá zhruba  $q_s = (0,7 - 1,0) \frac{MW}{m^2}$  [57].

Iterační cyklus skládající roštnice o předem známých rozměrech do plochy roštu dle podmínek o rozměrových poměrech délky a šířky roštu (hodnoty při poslední iteraci):

$$a_r = a_r + 2 \cdot a_{roštnice} [m] \quad (\text{délka roštu}) \quad (6.45)$$

$$a_r = 4,2 + 2 \cdot 0,3$$

$$a_r = 4,8 \text{ m}$$

$$b_r = \frac{S_r}{a_r} [m] \quad (\text{šířka roštu}) \quad (6.46)$$

$$b_r = \frac{12,65}{4,8}$$

$$b_r = 2,6 \text{ m}$$

$$N_b = \text{round} \left( \frac{b_r}{b_{roštnice}} \right) [-] \quad (\text{počet roštnic v řadě}) \quad (6.47)$$

$$N_b = \text{round} \left( \frac{2,6}{0,1} \right)$$

$$N_b = 26$$

$$N_a = \frac{a_r}{a_{roštnice}} [-] \quad (\text{počet řad roštnic}) \quad (6.48)$$

$$N_a = \frac{4,8}{0,3}$$

$$N_a = 16$$

$$b_{r,real} = N_b \cdot b_{roštnice} \quad (\text{skutečná šířka roštu}) \quad (6.49)$$

$$b_{r,real} = 26 \cdot 0,1$$

$$b_{r,real} = 2,6 \text{ m}$$

### 6.3.2 Výpočet: vstupní otvor – rozměry

Minimální výška dávkovacího otvoru:

$$h_{k,min} = \frac{3M_p}{\rho \cdot b_r \cdot u_b} [m] \quad (6.50)$$

$$h_{k,min} = \frac{3 \cdot 0,9073}{120 \cdot 2,6 \cdot 0,01}$$

$$h_{k,min} = 0,8725 \text{ m}$$

Projekční výška dávkovacího otvoru:

$$h_k = \text{round}(h_{k,\min}) [m] \quad (6.51)$$

$$h_k = \text{round}(h_{k,\min})$$

$$h_k = 0,9 \text{ m}$$

Výška čelní stěny:

$$h_v = h_k + 0,5 [m] \quad (6.52)$$

$$h_v = h_k + 0,5$$

$$h_v = 1,4 \text{ m}$$

### 6.3.3 Výpočet: klenby

Spád roštu:

$$h_r = a_r \sin \alpha_1 [m] \quad (6.53)$$

$$h_r = 4,8 \sin(15^\circ)$$

$$h_r = 1,2423 \text{ m}$$

Délka paprsku z konce roštu úseku na začátek přední klenby:

$$p = \sqrt{h_v^2 + a_r^2 - 2h_v a_r \cos \alpha_1} [m] \quad (6.54)$$

$$p = \sqrt{1,4^2 + 4,8^2 - 2 \cdot 1,4 \cdot 4,8 \cos(15^\circ)}$$

$$p = 5,365 \text{ m}$$

Úhel přední klenby:

$$\alpha_2 = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{h_v+h_r}{p}\right)}{2} [^\circ] \quad (6.55)$$

$$\alpha_2 = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{1,4+1,2423}{5,365}\right)}{2}$$

$$\alpha_2 = 30,16^\circ$$

Délka paprsku ze začátku roštu na spodek zadní klenby:

$$h_c = 1,5 h_v [m] \quad (6.56)$$

$$h_c = 1,5 \cdot 1,4$$

$$h_c = 2,1 \text{ m}$$

$$p_1 = \sqrt{h_c^2 + a_r^2 - 2h_c a_r \cos(90^\circ - \alpha_1)} \text{ [m]} \quad (6.57)$$

$$p_1 = \sqrt{2,1^2 + 4,8^2 - 2 \cdot 2,1 \cdot 4,8 \cos(90^\circ - 15^\circ)}$$

$$p_1 = 4,7151 \text{ m}$$

Úhel zadní klenby:

$$\alpha_3 = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{-a_r^2 + p_1^2 + h_c^2}{2p_1 h_c}\right)}{2} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (6.58)$$

$$\alpha_3 = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{-4,8^2 + 4,7151^2 + 2,1^2}{2 \cdot 4,7151 \cdot 2,1}\right)}{2}$$

$$\alpha_3 = 39,76^\circ$$

Délka paprsku z konce sušící části na spodek přední klenby:

$$p_2 = \sqrt{h_v^2 + \left(\frac{h_c}{p_s}\right)^2 - 2h_v \left(\frac{h_c}{p_s}\right) \cos(\alpha_1 + 90^\circ)} \text{ [m]} \quad (6.59)$$

$$p_2 = \sqrt{1,4^2 + \left(\frac{2,1}{0,25}\right)^2 - 2 \cdot 1,4 \left(\frac{2,1}{0,25}\right) \cos(15^\circ + 90^\circ)}$$

$$p_2 = 2,0663 \text{ m}$$

Úhel kappa:

$$\kappa = \cos^{-1}\left(-h_v^2 + p_2^2 + \frac{\left(\frac{a_r}{p_s}\right)^2}{2p_2 \left(\frac{a_r}{p_s}\right)}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (6.60)$$

$$\kappa = \cos^{-1}\left(-1,4^2 + 2,0663^2 + \frac{\left(\frac{4,8}{0,25}\right)^2}{2 \cdot 2,0663 \left(\frac{4,8}{0,25}\right)}\right)$$

$$\kappa = 40,88^\circ$$

Úhel gamma:

$$\gamma = 90^\circ - \frac{\alpha_2}{2} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (6.61)$$

$$\gamma = 90^\circ - \frac{30,16}{2}$$



Řešení:

$$p_4 = 2,2277 \text{ m}$$

$$\delta = 52,83^\circ$$

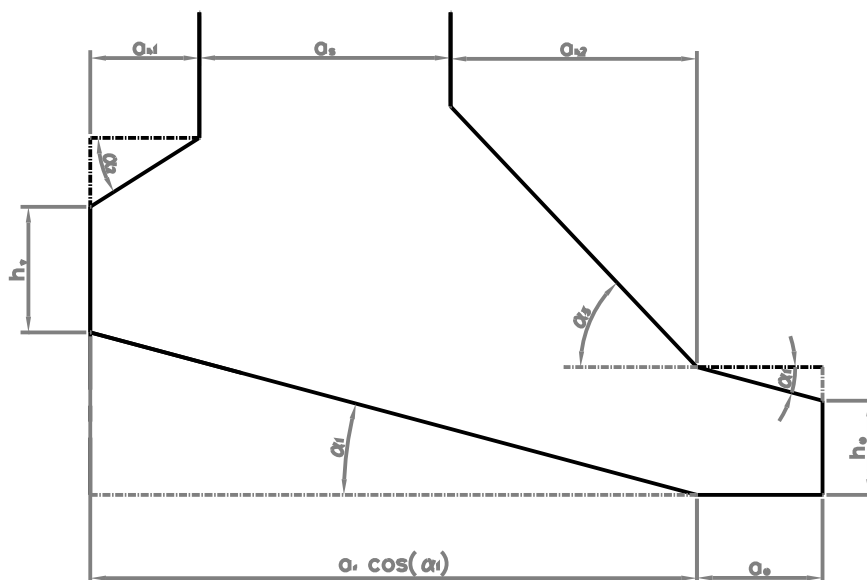
$$\omega = 41,49^\circ$$

$$p_5 = 4,4779 \text{ m}$$

$$\varphi = 63,59^\circ$$

$$x = 1,5286 \text{ m}$$

$$\lambda = 97,63^\circ$$



Obrázek 12: Rozměry a úhly ohniště

### 6.3.4 Výpočet: odvod spalin

Zadržná dráha ohniště:

$$l_{SP,min} = u_{SP,mean} k_{SP,profil} \tau_{SP} [m] \quad (6.69)$$

$$l_{SP,min} = 4 \cdot 1,5 \cdot 2$$

$$l_{SP,min} = 12 \text{ m}$$

kde  $u_{SP,mean} \left[ \frac{m}{s} \right]$  je zvolená střední rychlost spalin v dohořivací komoře, běžně cca 4 m/s [57]. Ve výstupním okně se uvažuje rychlost dvojnásobná ( $u_{ok,mean} = 8 \frac{m}{s}$ ). Význam  $k_{SP,profil} = 1,5 [-]$  je koeficient distribuce rychlostního profilu po průřezu komory.

$$l_{SP} = 1,1 l_{SP,min} [m] \quad (6.70)$$

$$l_{SP} = 1,1 \cdot 12$$

$$l_{SP} = 13,2 \text{ m}$$

K minimální zádržné dráze je připočten bezpečnostní přídavek 20 %.

Střední teplota spalin v dohořivací komoře:

$$t_{SP,mean} = \frac{t_{ok} + t_{adiabatic}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.71)$$

$$t_{SP,mean} = \frac{860 + 1328,6}{2}$$

$$t_{SP,mean} = 1094,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Průtok spalin pro normální podmínky:

$$M_{SP,N} = M_{pv} O_{SP} \left[ \frac{mN^3}{s} \right] \quad (6.72)$$

$$M_{SP,N} = 0,8603 \cdot 6,0274$$

$$M_{SP,N} = 5,1856 \frac{mN^3}{s}$$

Reálný průtok spalin:

$$M_{SP} = M_{SP,N} \frac{t_{SP,mean} + 273,15}{273,15} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (6.73)$$

$$M_{SP} = 5,1856 \frac{1094,3 + 273,15}{273,15}$$

$$M_{SP} = 25,9601 \frac{m^3}{s}$$

Podélný rozměr dohořivací komory:

$$a_s = \frac{M_{SP}}{u_{SP,mean} b_r} [m] \quad (6.74)$$

$$a_s = \frac{25,9601}{4 \cdot 2,6}$$

$$a_s = 2,4962 \text{ m}$$

Průřez dohořivací komory:

$$S_{SP} = a_s b_r [m^2] \quad (6.75)$$

$$S_{SP} = 2,5 \cdot 2,6$$

$$S_{SP} = 6,49 \text{ m}^2$$

Průtok spalin výstupním oknem:

$$M_{Ok} = M_{SP,N} \frac{t_{ok} + 273,15}{273,15} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (6.76)$$

$$M_{ok} = 5,1856 \frac{860+273.15}{273.15}$$

$$M_{ok} = 21,5121 \frac{m^3}{s}$$

Výška výstupního okna:

$$h_{ok} = \frac{M_{ok}}{u_{ok,mean} b_r} [m] \quad (6.77)$$

$$h_{ok} = \frac{21,5121}{8 \cdot 2,6}$$

$$h_{ok} = 1,0342 \text{ m}$$

Horizontální rozměr zadní klenby:

$$a_{k2} = a_r \cos \alpha_1 - a_{k1} - a_s [m] \quad (6.78)$$

$$a_{k2} = 4,8 \cos(15^\circ) - 1,3217 - 2,4962$$

$$a_{k2} = 0,8186 \text{ m}$$

Délka zadní klenby:

$$y = \frac{a_{k2}}{\cos \alpha_3} [m] \quad (6.79)$$

$$y = \frac{0,8186}{\cos(39,76^\circ)}$$

$$y = 1,0649 \text{ m}$$

### 6.3.5 Výpočet: tepelný výpočet ohniště

Výpočet je proveden tzv. Gurvičovou poloempirickou metodou, která je běžně užívána při návrhových výpočtech ohnišť pro pevná paliva [1, 30].

Součinitel M:

$$M = 0,59 - 0,5x_t [-] \quad (6.80)$$

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot 0$$

$$M = 0,59$$

kde  $x_t [-]$  je tzv. poměrná výška maximální teploty plamene. Tento parametr závisí na konstrukci spalovací komory a pro roštová ohniště se počítá s hodnotou  $x_t = 0$  [25].

Součinitel uchování tepla:

$$\varphi_t = 1 - \frac{Z_s}{\eta_k Z_s} [-] \quad (6.81)$$

$$\varphi_t = 1 - \frac{1,5184}{84,6663 \cdot 1,5184}$$

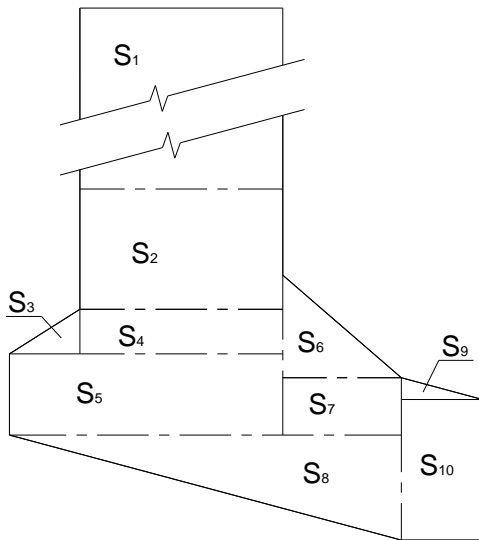
$$\varphi_t = 0,9882$$

Součinitel  $\varphi_t$  závisí na ztrátovém teple vysálaném do okolí vnějším pláštěm spalovacího zařízení (vyjádřené jako ztráta  $Z_s$  [%]) a kotlové účinnosti  $\eta_k$  [%].

Celkový povrch objemu ohniště:

$$\begin{aligned} S_{celk} &= \left( h_v + a_r + a_o + h_o + x + y + a_s + l_{SP} + \frac{a_o}{\cos \alpha_1} \right) b_r + \dots \\ &\quad (a_r \sin \alpha_1 + h_v + x \sin \alpha_2 + l_{SP} - h_c - y \sin \alpha_3) b_r + \dots \\ &\quad 2 \left( a_s l_{SP} + a_s \sin \alpha_2 + \frac{a_{k1} x \sin \alpha_2}{2} + \frac{a_{k2} y \sin \alpha_3}{2} \right) + \dots + \\ &\quad 2 \left( h_v (a_s a_{k1}) + \frac{a_r^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1}{2} + a_o h_o + \frac{a_o^2 \tan \alpha_1}{2} \right) + \dots \\ &\quad 2 (a_k (h_c - a_r \sin \alpha_1)) [m^2] \end{aligned} \quad (6.82)$$

$$S_{celk} = 201,95 m^2$$



Obrázek 13: Dílčí plochy boku ohniště

Aktivní objem ohniště:

$$V_o = b_r \left( a_s l_{SP} + a_s x \sin \alpha_2 + \frac{a_{k1} x \sin \alpha_2}{2} + \frac{a_{k2} y \sin \alpha_3}{2} + h_v (a_s + a_{k1}) + \dots \right)$$

$$\frac{a_r^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1}{2} + a_o h_o + \frac{a_o^2 \tan \alpha_1}{2} + a_{k2} (h_c - a_r \sin \alpha_1) \text{ [m}^3\text{]} \quad (6.83)$$

$$V_o = 120,54 \text{ m}^3$$

kde  $V_o \text{ [m}^3\text{]}$  je aktivní objem ohniště. V tomto případě představuje objem ohraničený povrchem  $S_{celk}$ .

Následující výpočty jsou opakovány v iterační smyčce. Vstupem do ní je požadavek na teplotu ve výstupním okně, ke které se výsledek přibližuje upravováním podílu membránové stěny vychlazující spaliny:

Střední tepelná jímavost spalin:

$$\overline{E}_{SP} = \frac{I_u - I_{ok}}{t_{adiabatic} - t_{ok}} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (6.84)$$

$$\overline{E}_{SP} = \frac{12665 - 7813}{1328,6 - 860}$$

$$\overline{E}_{SP} = 10,3537 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

V tomto případě je adiabatická teplota spalování  $t_{adiabatic} \text{ [}^\circ\text{C]}$  výsledkem předchozích výpočtů a teplota ve výstupním okně dohořivací komory  $t_{ok} \text{ [}^\circ\text{C]}$  je též volena a iteračně upravována.

Produkovávané spaliny mají měrnou entalpii, jejíž závislost na teplotě je popsána interpolační funkcí, která je výše použita pro výpočet adiabatické teploty plamene.  $I_u$  a  $I_{ok} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$  jsou měrné entalpie spalin, vyčíslené z této interpolační funkce, pro teploty  $t_{adiabatic}$  a  $t_{ok}$ .

Plocha povrchu membránové stěny:

$$S_{MS} = 2 (a_s h_{ms}) + 2 (b_r h_{ms}) - (b_r h_{ok}) \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.85)$$

$$S_{MS} = 21,36 \text{ m}^2$$

Plocha povrchu vyzdívky:

$$S_V = S_{celk} - S_{MS} - (h_v + a_o + h_{ok} + a_r) b_r \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.86)$$

$$S_V = 159,43 \text{ m}^2$$

Střední součinitel tepelné efektivnosti stěn:

$$\bar{\psi} = \sum_i \frac{x_{uhl,i} \xi_i S_i}{S_{celk}} \text{ [-]} \quad (6.87)$$

$$\bar{\psi} = \frac{1 \cdot 0,1 \cdot 159,43}{201,95} + \frac{1 \cdot 0,4 \cdot 21,36}{201,95}$$

$$\bar{\psi} = 0,1213$$

kde  $x_{uhl}$  [-] je součinitel úhlového osálení. Pro vyzdívku i membránovou stěnu přímo vystavenou radiaci proudících spalin je stanovena hodnota  $x_{uhl} = 1$  [25]. Symbol  $\xi$  [-] zastupuje součinitel zanesení stěn. Volené hodnoty pro výpočet jsou dle literatury  $\xi = 0.1$  pro vyzdívku a  $\xi = 0.4$  pro membránovou stěnu [25].  $S$  [ $m^2$ ] zastupuje povrch pokrytý danou stěnou (vyzdívka vs. membrána).  $S_{celk}$  [ $m^2$ ] je celková plocha ohraničující aktivní objem ohniště. Výpočet, stejně jako u dílčích ploch vyzdívky a membránové stěny, viz příloha 2.

Dává do souvislosti vliv vyzdívky, která udržuje teplo v ohništi a chlazené membránové stěny, které ochlazují spaliny na přijatelnou teplotu pro konvekční část kotle [25]. Výpočet  $\bar{\psi}$  je sumou podílu vyčísleného pro vyzdívku a podílu vyčísleného pro membránovou stěnu.

Boltzmannovo podobnostní číslo:

$$Bo = \frac{\varphi_t M_{pv} \bar{E}_{SP}}{5,7 \cdot 10^{-11} \bar{\psi} S_{celk} (t_{adiabatic} + 273,15)^3} \quad [-] \quad (6.88)$$

$$Bo = \frac{0,9882 \cdot 0,8603 \cdot 10,3537}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,1213 \cdot 201,95 (1328,6 + 273,15)^3}$$

$$Bo = 1,5345$$

Z Boltzmannova čísla je možné vypočítat přibližnou střední teplotu proudu spalin ve výstupním okně dohořivací komory. Do membránové stěny přechází přebytečné teplo zejména radiací, která je ovlivněna čerností prostředí. Pro určení teploty je tak nutné znát stupeň černosti ohniště [25]. Pro jeho výpočet se určí následující hodnoty.

Účinná tloušťka sálové vrstvy:

$$s_{vrst} = 3,6 \frac{V_o}{S_{celk}} [m] \quad (6.89)$$

$$s_{vrst} = 3,6 \frac{120,54}{201,95}$$

$$s_{vrst} = 2,1488 \text{ m}$$

Parciální tlak tříatomových nesvítících plynů v palivu:

$$p_{SP} = p_{ohniště} r_{sp} [MPa] \quad (6.90)$$

$$p_{SP} = 0,1 \cdot 0,2528$$

$$p_{SP} = 0,0255 \text{ MPa}$$

Součinitel zeslabení nesvítivými tříatomovými plyny:

$$k_{sal,1} = r_{sp} \frac{7,8+16 r_{sp,H_2O}}{3,16 \sqrt{p_{SP} s_{vrst}-1}} \cdot \left(1 - 0,37 \frac{t_{ok}+273,15}{1000}\right) [1/m MPa] \quad (6.91)$$

$$k_{sal,1} = 0,2528 \frac{7,8+16 \cdot 0,1480}{3,16 \sqrt{0,0255 \cdot 2,1488-1}} \cdot \left(1 - 0,37 \frac{860+273,15}{1000}\right)$$

$$k_{sal,1} = 1,8699 \cdot 1/m MPa$$

Součinitel zeslabení popílkem v úletu:

$$k_{sal,2} = \mu \frac{43}{\sqrt[3]{(t_{ok}+273,15)^2 d_{cp}^2}} [1/m MPa] \quad (6.92)$$

$$k_{sal,2} = 1,8366 \frac{43}{\sqrt[3]{(860+273,15)^2 20^2}}$$

$$k_{sal,2} = 0,0986 \cdot 1/m MPa$$

kde  $d_{cp}$  [ $\mu m$ ] je střední efektivní průměr částice popílku. Při výpočtu je použita hodnota  $d_{cp} = 20 \mu m$ , což je hodnota, kterou literatura [25] uvádí jako vhodnou pro projekční výpočty roštových ohnišť pro jakýkoli druh pevného paliva.

Součinitel zeslabení koksovými částicemi:

$$k_{sal,3} = 10 k_k \chi_1 \chi_2 [1/m MPa] \quad (6.93)$$

$$k_{sal,3} = 10 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,03$$

$$k_{sal,3} = 0,15 \cdot 1/m MPa$$

kde  $k_k = 1 [1/m MPa]$  udává rozměr. Součinitele  $\chi_{1,2}$  závisí na druhu paliva a druhu ohniště. Pro pevná paliva jiná, než uhelná, platí  $\chi_1 = 0,5$  a pro spalování na roštu  $\chi_2 = 0,03$  [25]. Při zónovém výpočtu spalovacího zařízení se  $\chi_2$  v závislosti na zóně pohybuje v intervalu  $\langle 0; 0,4 \rangle$  [25].

Součinitel zeslabení sálání:

$$k_{sal} = \sum_i k_{sal,i} [1/m MPa] \quad (6.94)$$

$$k_{sal} = 1,8699 + 0,0986 + 0,15$$

$$k_{sal} = 2,1186 \cdot 1/m MPa$$

Efektivní stupeň černosti plamene:

$$dark_{pl} = 1 - e^{(-k_{sal} p_{ohniště} s_{vrstvy})} [-] \quad (6.95)$$

$$dark_{pl} = 1 - e^{(-2,1186 \cdot 0,1 \cdot 2,1488)}$$

$$dark_{pl} = 0,3686$$

Stupeň černosti ohniště:

$$dark = \frac{dark_{pl} + (1 - dark_{pl}) \frac{Sr}{S_{celk}}}{1 - (1 - dark_{pl})(1 - \bar{\psi}) \left(1 - \frac{Sr}{S_{celk}}\right)} \quad [-] \quad (6.96)$$

$$dark = \frac{0,3686 + (1 - 0,3686) \frac{12,48}{201,95}}{1 - (1 - 0,3686)(1 - 0,1213) \left(1 - \frac{12,48}{201,95}\right)}$$

$$dark = 0,8502$$

Teplota ve výstupním okně:

$$t_{ok} = \frac{t_{adiabatic} + 273,15}{1 + M \left(\frac{dark}{Bo}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad [^{\circ}C] \quad (6.97)$$

$$t_{ok} = \frac{1328,6 + 273,15}{1 + 0,59 \left(\frac{0,8502}{1,5345}\right)^{0,6}} - 273,15$$

$$t_{ok} = 859,6 \quad ^{\circ}C$$

Pokud je hodnota  $t_{ok}$  dostatečně blízká původnímu vstupnímu odhadu ( $\pm 50 \text{ }^{\circ}C$ ), lze hodnotu považovat za konečnou [25]. V opačném případě, že je rozdíl větší, je nutné provést nový odhad, např. hodnotu nově spočtenou a provádět iterace celého tepelného výpočtu tak dlouho, dokud se obě teploty nepřiblíží.

Teplo odevzdané ohništi:

$$Q_s = \varphi(I_u - I_{ok}) \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (6.98)$$

$$Q_s = 0,9882(1266,5 - 7812,9)$$

$$Q_s = 4794,4 \quad \frac{kJ}{kg}$$

Tepelný výkon ohniště:

$$Q_{oh} = Q_s M_{pv} \quad [kW] \quad (6.99)$$

$$Q_{oh} = 4794,4 \cdot 0,8603$$

$$Q_{oh} = 4125 \quad kW$$

Koeficienty Gurvičovy metody a další mezivýpočty, které není třeba užít pro následnou konstrukci zařízení a bilanci soustavy nejsou v tabulce výsledků uvedeny.

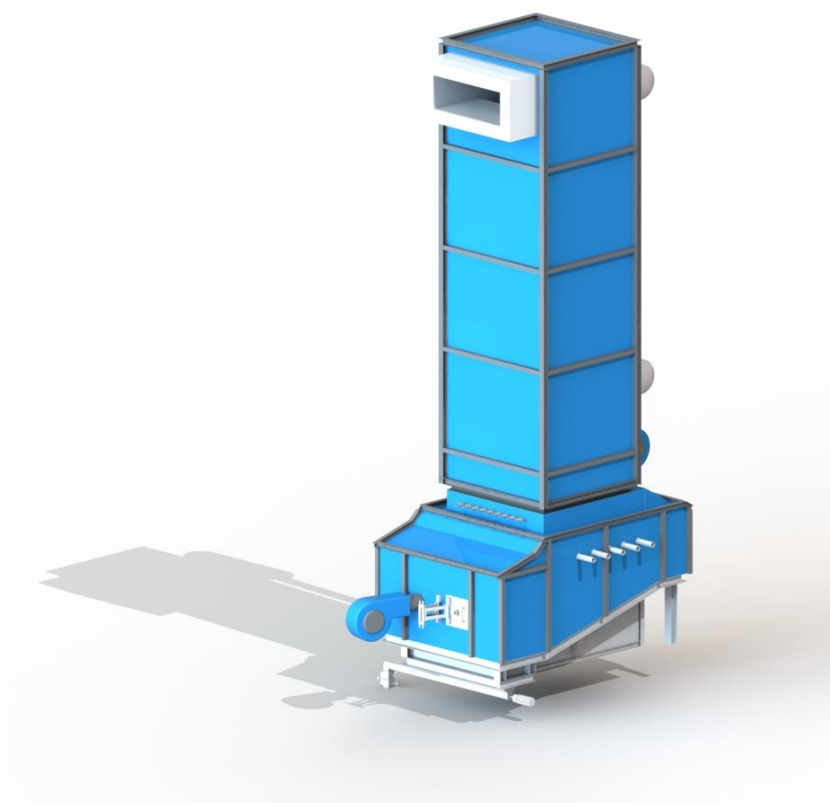
Tabulka 11: Dopočtené hodnoty, lze nalézt v protokolu v příloze (příloha 2)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>	
Teploty:	Zádržná teplota	850	°C
	Adiab. teplota plamene	1328,6	°C
	Výstup z doh. komory	859,6	°C
	Střed. tep. doh. v komoře	1094,3	°C
Bilance:	LHV	12549	kJ/kg <sub>pal</sub>
	Množství paliva	0,9074	kg/s
	Min. množství vlhkého vzduchu	3,3136	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub>
	Skut. množství vlhkého vzduchu	4,9704	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub>
Spaliny:	CO <sub>2</sub>	0,6303	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub>
	SO <sub>2</sub>	0,0016	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub>
	N <sub>2</sub>	2,5572	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub>
	Ar	0,0308	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub>
	H <sub>2</sub> O	0,8918	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub>
	Suché spaliny	3,4787	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub>
	Vlhké spaliny	6,0274	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub>
Ztráty:	Sdílení do okolí	1,52	%
	Citelné teplo spalin	8,08	%
	Chemický nedopal	0,10	%
	Fyzické teplo tuh. zbytků	0,41	%
	Mechanický nedopal	5,70	%
	Účinnost zařízení	84,67	%
Rošt:	Plocha	12,65	m <sup>2</sup>
	Délka	4,8	m
	Šířka	2,6	m
	Počet roštnic	432	-
Ohniště:	Povrch aktivního objemu	202	m <sup>2</sup>
	Plocha vyzdívky	159,4	m <sup>2</sup>
	Plocha membránové stěny	21,4	m <sup>2</sup>
	Aktivní objem	120,5	m <sup>3</sup>
	Úhel přední klenby	30	°
	Úhel zadní klenby	40	°
	Výkon	4125	kW
Dohořivací komora:	Výška	13,2	m
	Šířka	2,5	m
	Průřez	6,5	m <sup>2</sup>
	Výška výstupního okna	1	m

## 6.4 Konstrukce komory v grafickém prostředí SolidWorks

Z výše získaných rozměrových dat byl vytvořen 3D model uvažovaného zařízení a z něj byly odvozeny výkresy umístěné v *příloze 1* této práce.

Tato práce je primárně zaměřena na výpočet spalovací komory, nikoli konstrukční řešení jednotlivých detailů zařízení, které je záležitostí delšího vývoje a dalece překračuje odpovídající rozsah diplomové práce. Základní rozměry konstrukce byly však v rámci práce vyřešeny a použity k vykreslení přibližného návrhu spalovacího zařízení.



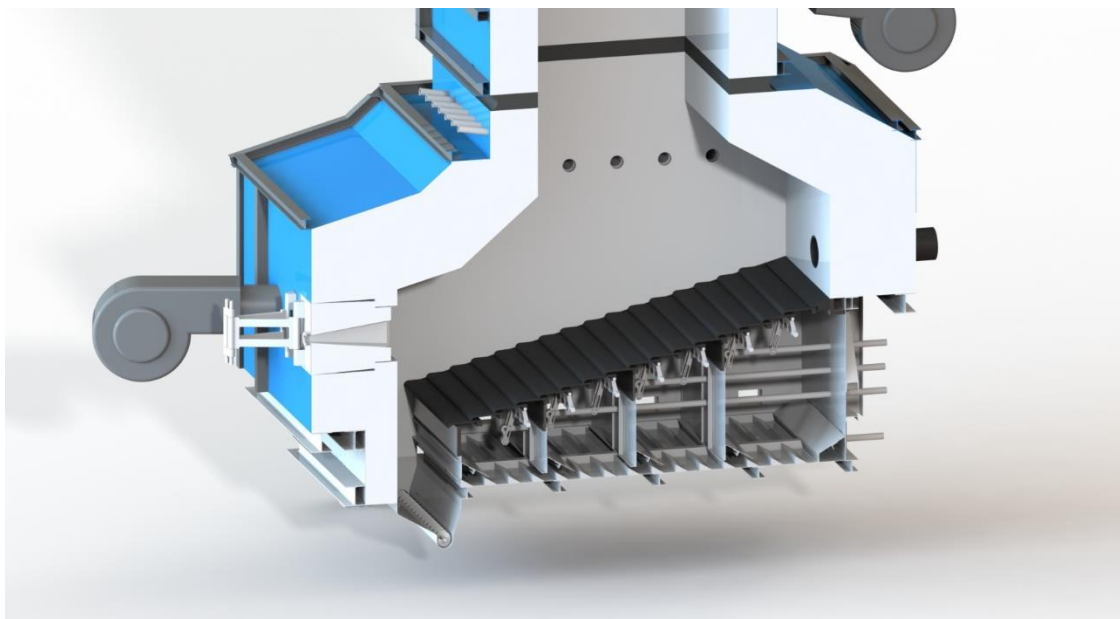
Obrázek 14: Vizualizace vypočtené spalovací komory

Z výpočtů uvedených výše v této zprávě byly získány vnitřní rozměry ohniště a dohořivací komory, podíl nutné membránové stěny, rozměry vstupních a výstupních otvorů a roštu. Dále byly určeny tloušťky a vrstvení vyzdívek dle dosahovaných teplot a rozměry dopravníku škváry v závislosti na bilanci popela.

S ohledem na tyto vypočtené hodnoty, zmíněné legislativní požadavky a autorovi známé principy konstruování spalovacích zařízení byla pro kompletaci této práce vytvořena vizualizace uvedená v této kapitole.

Detailní řešení jednotlivých prvků zařízení, jako je nosná konstrukce či mechanická část sestavy roštu je možnou náplní další práce autora.

Zde naznačený posuvný rošt využívá principu výkyvných pák, které v několika sekcích pohybují po vodících drážkách řadami posuvných roštnic.



Obrázek 15: Řez ohništěm a sestavou roštu

Páky řídící pohyb takových řad jsou ovládány vždy po několika společně táhlem hydraulického pístu.

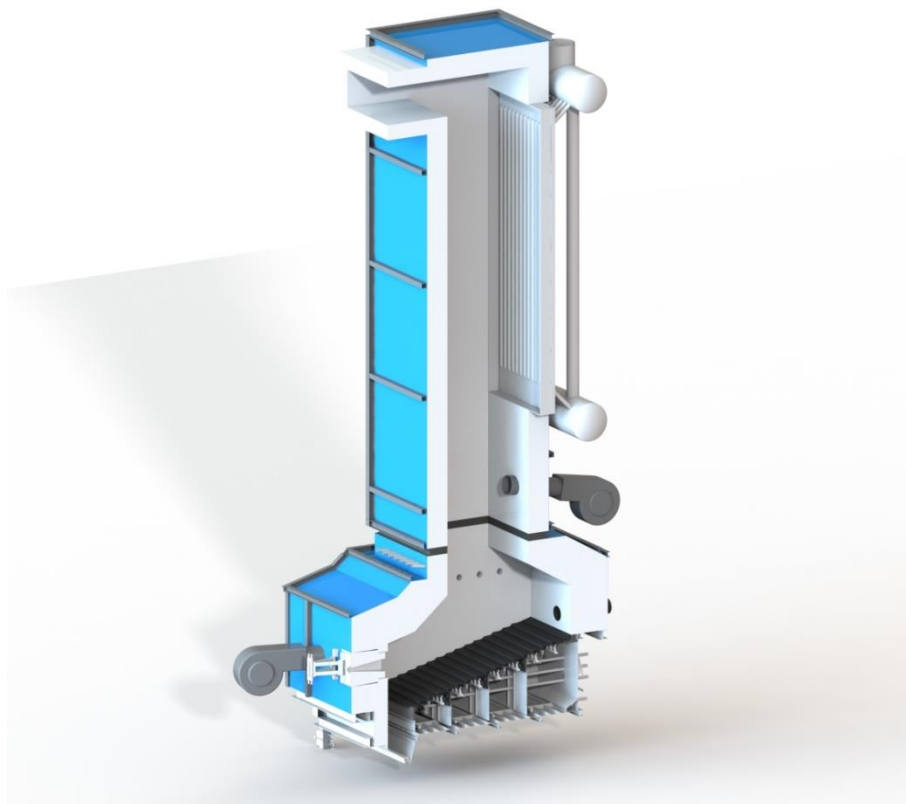
Rošt je dělen na 4 sekce primárního vzduchu. Regulaci přívodu vzduchu do jednotlivých sekcí je možné regulovat průběh hoření na roštu. Stejně tak sekce posuvu roštnic jsou řízeny třemi separátními hydraulickými válci, což je možné do jisté míry využít při regulaci distribuce hoření na ploše roštu.

Propad mezi roštnicemi dopadá na dno každé z komor vzduchových sekcí zvlášť. Mezi plechovým dnem svařence boxu roštového podstavce a dělicími stěnami sekcí je nízká mezera. Ta je vyplněna pohyblivým dnem, opět řízeným hydraulickým táhlem. Průchod vzduchu mezi sekcemi profukem mezi hrably pohyblivého dna je omezen plechovými svodkami propadového materiálu.

Nosná konstrukce je vnější, tvořená svařenými normalizovanými ocelovými nosníky. Vnější plášť je tvořen ocelovým plechem. Část váhy zařízení nese i vnitřní šamotová zděná vrstva – ostatní vrstvy vyzdívkou jsou však příliš málo mechanicky odolné pro tento účel.

Sekundární vzduch je rozdělen do dvou sad trysek. První sadou jsou boční přívody ve stěnách ohniště a druhou jsou trysky ostrého dmýchání v hrdle ohniště. Ty mají za úkol fungovat jednak jako možný způsob přívodu vzduchu pro vyhoření přečavé hořlaviny, ale také jako zdroj turbulence v dohořivací komoře pro intenzifikaci tohoto hoření.

Detaily této koncepční konstrukce s pozicemi zmiňovaných prvků je možné nalézt v příložených výkresech (*příloha 1*).



Obrázek 16: Řez spalovacím zařízením

## 6.5 Chlazení, regulace spalování, odvod škváry/popela

### 6.5.1 Regulace

Pro nastavení ideálního průběhu hoření je v uvažované komoře možné užít několik nástrojů.

#### Řízená rychlost posuvu roštu

Rošt se skládá ze střídajících se řad pevných a pohyblivých roštnic. Vždy 2 – 3 následující pohyblivé řady jsou do pohybu uváděny společným systémem táhla a páky. Táhlo je řízeno hydraulickým válcem.

Tímto způsobem je možné nezávisle řídit rychlost posuvu roštu v několika nezávislých zónách. Při potřebě je tak možné například déle zdržet palivo v dohořivací sekci roštu, nebo jej naopak urychlit skrze zápalnou zónu, pokud by bylo účelné průběh vyhoření více rozprostřít po roštové ploše.

## Zónování primárního vzduchu

Po délce roštu probíhají různé fáze hoření od zápalu po dohořívání zbytků. Každá fáze vyžaduje jiný podíl vzdušného kyslíku. Pokud by byl vzduch vháněn do celého prostoru pod roštem bez regulace dělením na zóny, byl by kyslíku nadbytek v místech roštu, kde jej není tolik třeba a naopak by chyběl ve fázi hoření.

Průtok primárního vzduchu jednotlivými zónami také zajišťuje intenzitu jejich chlazení.

## Recirkulace části spalin pod rošt

Recirkulace spalin pod zónu sušení (ve směsi s odpovídajícím dílem primárního vzduchu) umožňují intenzifikaci sušení a spodního zápalu. Spaliny je možné míchat i do sekundárního vzduchu vedeného do trysek ostrého dmýchání.

## Nastavování průtoku sekundárního vzduchu do jednotlivých trysek

Přívod sekundárního vzduchu je uvažován nejen řadami trysek po obou stranách komory nad roštem, ale také tryskami ostrého dmýchání. Změny v celkovém průtoku vzduchu mění stechiometrii prostředí. Vyšší průtok tryskami ostrého dmýchání pak intenzifikuje vyhoření prchavých látek za pomoci turbulence. Jek bylo zmíněno výše, tento turbulentní proud se dá posílit přimíšením recirkulovaných spalin.

## Použití pomocných plynových hořáků

Při nestandardním provozu s příliš nekvalitním palivem je možné dohánět teplotu spalin stabilizačním hořákem. Ve výjimečných případech se k tomuto účelu dá užít i zápalný hořák na čele ohniště, jehož účelem je však primárně vyhřívání vyzdívky a zapalování paliva při nájezdu zařízení.

## 6.5.2 Odvod popela a strusky

Po projití všemi stadii hoření na roštu až po dohoření popelovin jsou zbytky ve formě popela a strusky svedeny z dolního konce roštu do odvodního žlabu, odkud jsou u menších zařízení odváděny šnekovými dopravníky.

U větších roštových ohnišť jsou popeloviny ze žlabu odváděny redlerem umístěným pod vodní hladinou – tzv. mokrým vynašečem. V některých případech je výhodné využít tzv. suchý výpad, kdy redler není zatopen vodou, ale je voleno jiné technické řešení utěsnění.

Vynašecí zařízení, ať už jde o šnekový dopravník, či redler, musí mít odvodní žlab zahlubovaný dostatečně na to, aby bylo zařízení odstíněno od sálání z ohniště. S výjimkou mokrých vynašečů je vhodné nastavit výkon odvádění popelovin tak, aby bylo vynašecí zařízení vždy zasypáno dostatečnou vrstvou, která brání výraznějšímu tepelnému opotřebení [18].

Odvod propadu z pod roštu se řeší nejčastěji pomocí klínové pohyblivé podlahy. U malých zařízení, zejména na biomasu, která má obecně malý obsah popelovin, je v mnoha případech popel z propadu odstraňován manuálně po vhodných intervalech skrze servisní otvory [18].

Velká ohniště, opatřená zónováním primárního vzduchu mohou mít odvod propadu z každé sekce řešen užitím šikmých stěn vzduchové komory, které jako násypka přivádí popel propadlý roštem do turniketu či dvojklapky na dně. Ta oddělí přetlak vzduchové komory pod roštem od atmosférického tlaku v dopravníku.

Dopravník<sup>11</sup> odvádí popeloviny z propadu na další zpracování. Při spalování běžného komunálního odpadu má propad vlastnosti dostatečně blízké popelu vyvedenému z konce roštu a je možné je mísit [12, 21]. Ve výjimečných případech a při velkých zpracovatelských kapacitách může být propad vrácen zpět do ohniště ke snížení ztráty nedopalem [21].

Do uvažovaného zařízení je dle výpočtů při nominálním provozu nutno přivádět tok paliva v průměru 0,91 kg/s, tedy 3,27 t/h. Podíl popelovin v palivu je zhruba 4,43 hm.%.

Je uvažována rezerva s ohledem na možné odchylky podílu popelovin způsobené palivem nižší kvality a počítá se tak s podílem popelovin 10 hm.%.

Při výpočtech bylo třeba na základě rešerše odhadnout podíly složek tuhých zbytků. Jako typická hodnota zastoupení škváry v popelu je volena hodnota 65 hm.%.

Při zanedbání koeficientu M, tedy podílu popeloviny vůči popelu<sup>12</sup> (nezaměňovat s koeficientem M Gurvičovy metody tepelného výpočtu) tak připadá na nominální výkon potřeba odvádět následující hmotnostní tok škváry:

$$\dot{m}_s = M_{pv} \cdot A \cdot X_s \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (7.1)$$

$$\dot{m}_s = 0,91 \cdot 0,1 \cdot 0,65 = 0,0592 \frac{kg}{s} = 0,2126 \frac{t}{h}$$

Sypná hmotnost škváry se pohybuje dle setřepání v rozmezí 750 – 1000 kg/m<sup>3</sup> [59].

Tím pádem se dá předpokládat nominální objemový tok škváry dopravníkem následovný:

$$\dot{V}_s = \frac{\dot{m}_s}{\rho_s} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (7.2)$$

$$\dot{V}_s = \frac{0,2126}{750} \cdot 1000 = 0,2835 \frac{m^3}{h}$$

Tento tok je možné adekvátně odvádět šnekovým dopravníkem. Povaha zde voleného paliva tuto variantu též nevyklučuje (například kvůli velkým nespalitelným kusům v ‚surovém‘ odpadu, které jsou u TAP briket eliminovány) [60].

<sup>11</sup> Šnekový či pneumatický

<sup>12</sup> Při tak velké rezervě kapacity (10 hm.% namísto 4,43 hm.%) není třeba takové detaily vůbec uvažovat

Zpod výpadu komory bude vyveden horizontální dopravník s plnou šnekovnicí a excentrickým usazením šnekovnice v otevřené části žlabu. Plná šnekovnice zlepší oddělení objemu ohniště od neexponovaného objemu dopravníku, při zastaveném posuvu udrží ve výsypu ohniště lépe izolační vrstvu popela chránící šnekovnici před radiací z komory a zároveň je konstrukčně vhodná pro sypké materiály, jako je očekávaný popel z roštu. Excentricita dále snižuje pravděpodobnost, že by se v otevřené části dopravníku mohly vzpříčit dopravované částice [60].

Pro kusovitý abrazivní materiál, jako je škvára s popelem, se doporučuje navrhovat šnekové dopravníky s frekvencí otáčení  $n = 0,2 - 1 \text{ s}^{-1}$ , zaplněním dopravníku  $\psi = 0,15$  a uvažovat se součinitelem odporu materiálu  $K = 3 - 3,5$  [60].

Pro vodorovný dopravník platí součinitel sklonu dopravy  $c_H = 1$ , stoupání šroubové plochy šnekovnice byl zvolen doporučený poměr  $s = 0,8 D$  [60].

Pro kapacitu dopravníku se doporučuje následující poměr:

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot s \cdot n \cdot \psi \cdot c_H \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (7.3)$$

Po úpravě tedy platí pro návrh průměru šnekovnice:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \dot{V}}{3600 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot n \cdot \psi \cdot c_H}} \text{ [m]} \quad (7.4)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,2835}{3600 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 0,2 \cdot 0,15 \cdot 1}} = 0,1611 \text{ m} \rightarrow 0,18 \text{ m}$$

S přihlédnutím k nutnosti vůle šnekovnice v plášti je volena jako koryto dopravníku trubka o nominální světlosti DN 200 [61]. Šnekovnice uvnitř má průměr 180 mm a volný prostor vymezuje vzhledem k doporučeným hodnotám adekvátní vůli.

Vzhledem k povaze paliva nebude docházet ke vzpříčování částic v dopravníku. Materiál a detailní konstrukce vynášecího zařízení zde řešena není.

Pro kompletnost návrhu dopravníku lze odhadnout nutný měrný příkon ( $g \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^{-2}} \right]$  značí normální tíhové zrychlení, ostatní koeficienty viz výše v této kapitole):

$$\frac{P}{L} = \frac{\dot{V}_s \cdot \rho_s \cdot g \cdot K}{3600} \left[ \frac{\text{kW}}{\text{m}} \right] \quad (7.5)$$

$$\frac{P}{L} = \frac{0,2835 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,5}{3600} = 2,70 \frac{\text{kW}}{\text{m}}$$

Při šířce roštu určené jako 2,7 m je uvažováno s dopravníkem o délce 5 m. To znamená měrný příkon cca  $P = 13,5 \text{ kW}$ .

Pro konstrukci dopravníku, zejména kvůli volbě uložení, je vhodné znát odhad axiální síly, jíž působí dopravovaná škvára na šnekovnici [60].

$$F_{ax} = \frac{M_k}{0,75 \cdot D \cdot \tan(\alpha_s + \varphi_e)} [N] \quad (7.6)$$

kde  $M_k [Nm]$  je hnací moment,  $\alpha_s [^\circ]$  úhel stoupání šnekovnice a  $\varphi_e [^\circ]$  vnější třecí úhel dopravované škváry.

Hnací moment:

$$M_k = \frac{P}{2\pi n} [Nm] \quad (7.7)$$

$$M_k = \frac{13,5}{2\pi \cdot 0,2} = 10,74 \text{ kNm}$$

Úhel stoupání šnekovnice:

$$\alpha_s = \arctan\left(\frac{0,8D}{\pi D}\right) = \arctan\left(\frac{0,8}{\pi}\right) [^\circ] \quad (7.8)$$

$$\alpha_s = \arctan\left(\frac{0,8}{\pi}\right) = 14,3^\circ$$

Vnější třecí úhel (založený na odhadu třecího koeficientu  $f \doteq 0,5$  [59]):

$$\varphi_e = \arctan(f) [^\circ] \quad (7.9)$$

$$\varphi_e = \arctan(0,5) = 26,6^\circ$$

$$F_{ax} = \frac{10743}{0,75 \cdot 0,18 \cdot \tan(14,3 + 26,6)} = 91,9 \text{ kN}$$

Vzhledem k volbě frekvence otáčení na nižším konci doporučeného rozsahu není třeba zde provádět kontrolu na kritické otáčky.

Kvůli zamezení přisávání falešného vzduchu je výpad z dopravníku opatřen dvojklapkou.

### 6.5.3 Vyzdívka a izolace

Vrstva vyzdívky a další izolační vrstvy mají za cíl zajistit adekvátní povrchovou teplotu zařízení. Jednak kvůli nižším tepelným ztrátám, ale také kvůli bezpečnosti obsluhy.

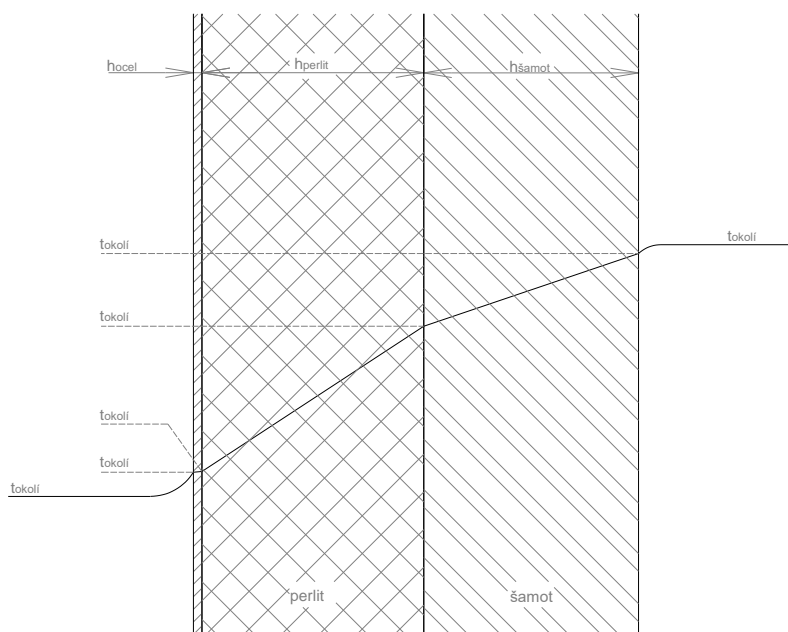
Povrchová teplota zařízení je volena dle ČSN 07 0620 [50]. Norma udává tuto teplotu na hodnotu o 25 K vyšší, než je teplota okolního vzduchu. Návrhová teplota vzduchu okolí byla volena na  $t_{out} = 25^\circ C$ , což znamená návrhovou dotykovou teplotu  $t_{ow} = 50^\circ C$ . Reálná teplota okolního vzduchu bude v závislosti na odvětrávání prostor kotelný patrně vyšší.

Pro potřeby dimenzování izolace byla komora rozdělena na dvě uvažované zóny – ohniště a dohořivací prostor. Jako návrhová teplota vnitřního prostředí ohniště poslouží adiabatická teplota hoření ( $t_{adiabatic} = 1328,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) a střední teplota spalin vypočtená pro dohořivací komoru ( $t_{SP,mean} = 1094,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Teplota vnitřní stěny se ve výpočtu uvažuje stejná, jako teplota spalin <sup>13</sup>.

Izolace je navržena jako třívrstvá. Vnitřní vrstva je sestavena z šamotových tvárnic, které lépe odolávají žáru a abrazi. Střední vrstva je volena z lehčených izolačních cihel (např. perlito–cementové cihly ‚Peril‘ [62]). Případné dilatační mezery uvnitř těchto vrstev a mezi vrstvami autor navrhuje ucpat rohožemi z křemíkových vláken ‚Fiberfrax‘ (dříve ‚Sibral‘) [63].

Vnější plášť tvoří ocelový plech navařený na kostru zařízení.

Tepelný tok je uvažován vůči ztrátám radiací a přirozenou konvekcí na vnějším povrchu. Vrstvy tvárnic jsou svojí tloušťkou navrženy s ohledem na dodávané rozměry. Při nedodržení dotekové teploty je povrch obalen adekvátní vrstvou minerální vlny, jejíž tloušťka je doložena s ohledem na potřebu dosažení této teploty. Vnější povrch je kryt ochranným plechem o emisivitě ovlivněné jeho povrchovou úpravou (zde autor počítal s hodnotou  $\varepsilon = 0,3$  [64]). Emisivita vnitřní stěny šamotové vyzdívky se pak uvažuje  $\varepsilon = 0,75$  [65].



Obrázek 17: Prostup tepla vrstvami vyzdívky – zjednodušené schéma

<sup>13</sup> S ohledem na daný radiační tepelný tok dle Stefan-Boltzmannova zákona se teplota stěny a okolí musí blížit

Měrný tepelný tok radiací:

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{stěna}^4 - T_{okolí}^4) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (8.1)$$

kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K}$  značí Stefan–Boltzmannovu konstantu,  $\varepsilon [-]$  značí emisivitu povrchu a  $T [K]$  teploty odpovídající indexu [66, 67].

Měrný tepelný tok přirozenou konvekcí:

$$\dot{q}_{conv} = \alpha_{conv}(t_{stěna} - t_{okolí}) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (8.2)$$

kde  $\alpha_{conv} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$  značí koeficient přestupu tepla a  $t [^\circ C]$  teploty odpovídající indexu. Zároveň je  $\alpha_{conv}$  funkcí Nusseltova čísla  $Nu [-]$ . Platí:

$$\alpha_{conv} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8.3)$$

kde  $\lambda = 0,0255 \left[ \frac{W}{m K} \right]$  je tepelná vodivost prostředí (zde okolního vzduchu [59]) a  $L [m]$  je charakteristický rozměr chlazené plochy (zde zjednodušeně vztaženo k největšímu rozměru komory, tzn.  $L \doteq 5 m$ ).

Nusseltovo číslo  $Nu$  je při přirozené konvekcí funkcí Grashofova čísla  $Gr [-]$  a Prandtlova čísla  $Pr [-]$ :

$$Nu = A(Gr \cdot Pr)^B [-] \quad (8.4)$$

Součin Grashofova čísla a Prandtlova čísla se označuje jako Rayleighovo číslo [66].

Tabulka 12: Koeficienty pro odhad Nusseltova čísla [68]

$Gr \cdot Pr$	$< 0,001$	$0,001 - 500$	$500 - 2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$
<b>A</b>	0,5	1,18	0,54	0,135
<b>B</b>	0	1/8	1/4	1/3

Nutná podobnostní čísla se pak vypočtou následovně:

Grashofovo číslo:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho \cdot L^3 \cdot (t_{stěna} - t_{okolí})}{\mu^2} [-] \quad (8.5)$$

kde  $\beta \left[ \frac{1}{K} \right]$  značí koeficient objemové roztažnosti prostředí,  $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  hustotu prostředí a  $\mu [Pa \cdot s]$  jeho dynamickou viskozitu.

Prandtlovo číslo:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} [-] \quad (8.6)$$

kde  $c_p \left[ \frac{kJ}{kg K} \right]$  značí měrnou tepelnou kapacitu prostředí.

Měrný tepelný tok kondukcí:

Vedením (kondukcí) musí být dle zákona zachování energie přiváděno stejné měrné teplo, jaké je v součtu odvedeno radiací a konvekcí [66, 67].

$$\dot{q}_{cond} = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{conv} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (8.7)$$

Zároveň musí pro každou vrstvu izolace platit:

$$\dot{q}_{cond} = \frac{\lambda_i}{h_i} (t_{stěna,i} - t_{stěna,i-1}) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (8.8)$$

kde  $\lambda_i \left[ \frac{W}{m K} \right]$  je koeficient tepelné vodivosti a  $h_i [m]$  je tloušťka  $i$ -té vrstvy izolace.

Tabulka 13: Tepelné vodivosti vybraných izolačních materiálů

Materiál	Klas. teplota [°C]	$\lambda_i \left[ \frac{W}{m K} \right]$						Popis	Zdroj
		200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C	1200 °C		
PROTHERM ZBL 125	1280	-	0,31	0,34	0,38	0,42	-	Šamotový žárobeton; velká zrna	[69]
PROTHERM ZBL 130	1300	-	0,15	0,17	0,20	0,24	-	Šamotový žárobeton; malá zrna	[69]
OPATERM SL 10P-150	1500	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,57	Šamotové tvárnice pro vyšší teploty	[69]
OPATERM SL 6P-125	1250	0,21	0,23	0,26	0,29	0,34	0,40	Šamotové tvárnice pro střední teploty	[69]
OPATERM SL 5-90	900	0,13	0,14	0,17	0,20	-	-	Šamotové tvárnice pro nižší teploty	[69]
PROMAGLAF HTI 1200	1200	0,05	0,10	0,16	0,23	0,31	-	Rohož ze skelného vlákna	[70]
Fiberfrax („Sibral“)	1250	-	-	0,11	0,16	0,21	-	Rohož z křemičitého vlákna	[63, 71]
Perlitové tvarovky	1090	0,06	-	0,08	-	-	-	Perlitové cihly	[72]
KERABRICK 23A	1300	0,19	0,20	0,23	0,28	-	-	Perlitové cihly	[73]

Materiál	Klas. teplota [°C]	$\lambda_i \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$						Popis	Zdroj
		200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C	1200 °C		
PROMATON K23	1300	-	0,15	0,17	0,19	0,21	-	Lehčený žárobeton	[74]
PROMAT	900	-	0,12	0,14	0,17	-	-	Perlitové cihly	[74]
PROMASIL 1100 SUPER	1050	0,075	0,084	0,101	0,125	-	-	Lehčené křemičité desky	[74]
FIBRATEC MD-2300	1316	0,09	0,09	0,11	0,13	0,16	0,17	Desky z keramického vlákna	[73]
NOVOBET 1450-RA	1450	-	1,66	1,70	1,90	2,02	-	Žárobeton	[75]
Cihly JM 25	1260	.	0,12	0,14	0,17	0,19	-	Žáruvzdorné cihly	[76]
Rockwool TECHROCK 150	720	0,076	0,135	0,225	-	-	-	Rohože z minerální vaty	[77]
Rockwool WM 105	750	0,058	0,105	0,175	-	-	-	Rohože z min. vaty na pletivu	[77]

Uvažované povrchy, na kterých dochází k tepelným ztrátám, jsou rovinné. Většina z nich je vertikální (s výjimkou kleneb), proto autor přistoupil ke zjednodušení a použije vždy stejnou reálnou hodnotu koeficientu přestupu tepla do okolí. Kdyby se jednalo o kontrolní výpočet reálné geometrie a bylo třeba znát tepelné toky co nejpřesněji, bylo by uvažováno s vlivem polohy povrchu vůči chladicímu médiu v prostoru [67].

U rovinných vrstev je po tloušťce konstantní jak tepelný tok  $\dot{Q}$  [W], tak jeho hustota  $\dot{q}$   $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$ . Rovnice přenosu tepla se tedy dají uvažovat i bez započtení vlivu rozměrů.

Pokud se při návrhu počítá s teplotou vnitřní stěny vyzdívky shodné s teplotou hoření, její reálná nižší teplota vůči plamenu vždy zajistí výsledky návrhu „na bezpečné straně“.

Fyzikální vlastnosti vzduchu potřebné pro výpočty Nusseltova čísla jsou interpolovány v závislosti na střední teplotě vrstvy z dat ze zdroje [78]. Vlastnosti tepelně izolačních materiálů jsou převzaty ze zdrojů uvedených v tabulce výše.

Program obsahuje fyzikální data o materiálech v závislosti na teplotě a vektory dostupných rozměrů bloků vyzdívky. Řešení probíhá iterací ve dvou úrovních. Vnější cyklus porovnává dopočtenou vnitřní teplotu se zadáním (dle výsledků návrhového výpočtu spalovací komory). Pokud je dopočtená teplota vnitřní stěny příliš nízká, tedy vyzdívka je příliš tenká pro požadovanou teplotu, cyklus použije větší cihly, respektive přidá další vrstvu.

Tabulka 14: Fyzikální vlastnosti vzduchu [78]

Teplota [°C]	Hustota [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	Měrné teplo [ $\frac{kJ}{kg K}$ ]	Tep. vodivost [ $\frac{W}{m K}$ ]	Kin. viskozita [ $10^{-6} \frac{m^2}{s}$ ]	Koef. roztažnosti [ $10^{-3} \frac{1}{K}$ ]
-150	2,793	1,026	0,012	3,800	8,210
-100	1,980	1,009	0,016	5,950	5,820
-50	1,534	1,005	0,020	9,550	4,510
0	1,293	1,005	0,024	13,300	3,970
20	1,205	1,005	0,026	15,110	3,430
40	1,127	1,005	0,027	16,970	3,200
60	1,067	1,009	0,029	18,900	3,000
80	1,000	1,009	0,030	20,940	2,830
100	0,946	1,009	0,031	23,600	2,680
120	0,898	1,013	0,033	25,230	2,550
140	0,854	1,013	0,034	27,550	2,430
160	0,815	1,017	0,036	29,850	2,320
180	0,779	1,022	0,037	32,290	2,210
200	0,746	1,026	0,039	34,630	2,110
250	0,675	1,034	0,042	41,170	1,910
300	0,616	1,047	0,045	47,850	1,750
350	0,566	1,055	0,049	55,050	1,610
400	0,524	1,068	0,052	62,530	1,790

#### 6.5.4 Návrhový výpočet vyzdívky

Měrný tepelný tok radiací vně izolace:

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{stěna}^4 - T_{okolí}^4) \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$\dot{q}_{rad} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 \cdot ((50 + 273,15)^4 - (25 + 273,15)^4)$$

$$\dot{q}_{rad} = 0,10 \frac{W}{m^2}$$

Grashofovo číslo:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho \cdot L^3 \cdot (t_{stěna} - t_{okolí})}{\mu^2} [-]$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 0,0316 \cdot 1,1368 \cdot 5^3 \cdot (50 - 25)}{(1,8925 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 3,1369 \cdot 10^{11}$$

Prandtlovo číslo:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} [-]$$

$$Pr = \frac{1012,6 \cdot 1,8925 \cdot 10^{-5}}{0,0263}$$

$$Pr = 0,7279$$

Rayleighovo číslo:

$$Ra = Gr \cdot Pr [-]$$

$$Ra = 3,1369 \cdot 10^{11} \cdot 0,7279$$

$$Ra = 2,2835 \cdot 10^{11}$$

Nuseltovo číslo:

$$Nu = A(Ra)^B [-]$$

$$Nu = 0,135 (2,2835 \cdot 10^{11})^{0,333}$$

$$Nu = 817,9879$$

Koeficient přestupu tepla:

$$\alpha_{conv} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$\alpha_{conv} = \frac{817,9879 \cdot 0,0263}{5}$$

$$\alpha_{conv} = 4,3069 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Měrný tepelný tok konvekcí vně izolace:

$$\dot{q}_{conv} = \alpha_{conv} (t_{stěna} - t_{okolí}) \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$\dot{q}_{conv} = 4,3069 (50 - 25)$$

$$\dot{q}_{conv} = 107,67 \frac{W}{m^2}$$

Hustota tepelného toku kondukcí:

$$\dot{q}_{cond} = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{conv} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$\dot{q}_{cond} = 0,10 + 107,67$$

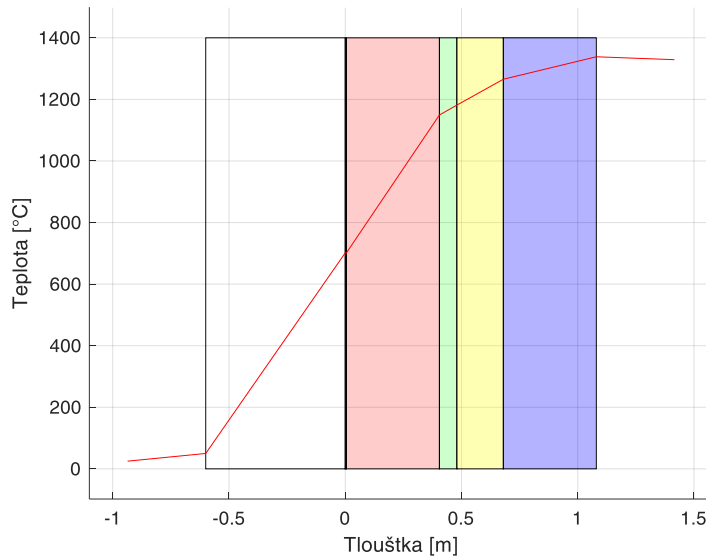
$$\dot{q}_{cond} = 107,77 \frac{W}{m^2}$$

Zároveň musí pro celou vyzdívku a izolaci platit:

Konduktance v závislosti na materiálech izolace – ohniště:

$$\dot{q}_{cond} = \frac{(t_{adiabatic} - t_{w,out})}{\sum \frac{h_i}{\lambda_i}} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (8.9)$$

$$\dot{q}_{cond} = 107,77 \frac{W}{m^2} \cong \frac{(1328,6 - 50)}{\frac{0,6}{0,1} + \frac{0,005}{41,04} + \frac{0,4}{0,1} + \frac{0,075}{0,25} + \frac{0,2}{0,18} + \frac{0,4}{0,58}}$$

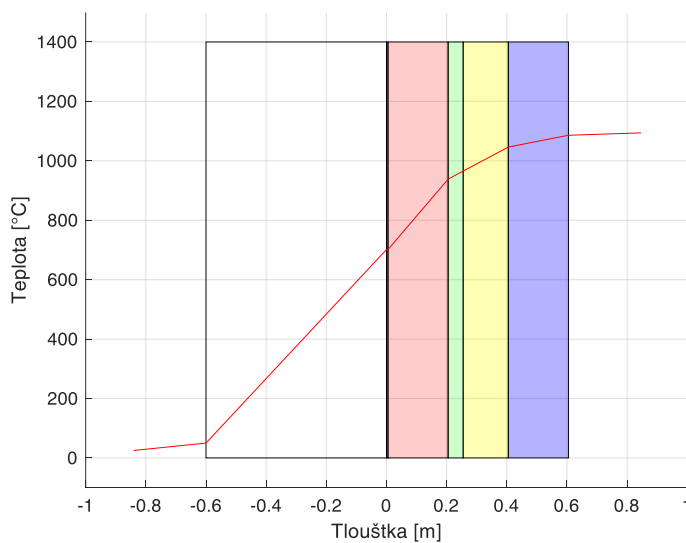


Graf 3: Grafické znázornění průběhu teplot vyzdívkou a izolací – ohniště (popis vrstev viz tab. 14)

Konduktce v závislosti na materiálech izolace – dohořivací komora:

$$\dot{q}_{cond} = \frac{(t_{SP,mean} - t_{w,out})}{\sum \frac{h_i}{\lambda_i}} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (8.10)$$

$$\dot{q}_{cond} = 107,77 \frac{W}{m^2} \cong \frac{(1094,3 - 50)}{\frac{0,6}{0,1} + \frac{0,005}{41,04} + \frac{0,2}{0,09} + \frac{0,05}{0,2} + \frac{0,15}{0,15} + \frac{0,2}{0,54}}$$



Graf 4: Grafické znázornění průběhu teplot vyzdívkou a izolací - dohořivací komora (popis vrstev viz tab. 14)

Šířka vrstvy Sibralu je uvažována v závislosti na předpokládané tepelné roztažnosti ostatních vrstev<sup>14</sup>. Měrná tepelná vodivost vrstvy je uvažována při střední teplotě dané vrstvy, určení této hodnoty zajišťuje vnořený iterační cyklus při výpočtu každé z vrstev. Tloušťky vrstev jsou voleny v násobcích dodávaných rozměrů volených tvárnice, desek a rohoží.

Tabulka 15: Rozpis navržené izolace a vyzdívky

Vrstva		1	2	3	4	5	6
<b>Ohniště</b>	<b>Materiál</b>	Izolační vata (vnější izolace)	Ocelový plech (plášť)	Perlitové tvárnice	Sibral (dilatační spára)	Mezivrstva (žáruvzdorné desky)	Šamotové tvárnice (vnitřní vyzdívka)
	<b>Specifikace</b>	Rockwool WM 105	Tř. 11	KERABRICK 23A	FIBERFRAX Durablanket S 25	FIBRATEC MD-2300	OPATERM SL 10P-150
	<b>Klasifikační teplota [°C]</b>	750	-	1300	1250	1316	1500
	<b>Tloušťka [mm]</b>	600	5	400	75	200	400
	<b>Teploty stěn vrstvy [°C]</b>	50 – 701	701	701 – 1127	1127 – 1160	1160 – 1245	1245 – 1319
	<b>Střední <math>\lambda_t \left[ \frac{W}{m K} \right]</math></b>	0,10	41,04	0,10	0,25	0,18	0,58
<b>Dohořivací komora</b>	<b>Materiál</b>	Izolační vata (vnější izolace)	Ocelový plech (plášť)	Perlitové tvárnice	Sibral (dilatační spára)	Mezivrstva (žáruvzdorné desky)	Šamotové tvárnice (vnitřní vyzdívka)
	<b>Specifikace</b>	Rockwool WM 105	Tř. 11	KERABRICK 23A	FIBERFRAX Durablanket S 25	PROMASIL 1100 Super	OPATERM SL 10P-150
	<b>Klasifikační teplota [°C]</b>	750	-	1300	1250	1050	1500
	<b>Tloušťka [mm]</b>	600	5	200	50	150	200
	<b>Teploty stěn vrstvy [°C]</b>	50 – 701	701	701 – 938	938 – 965	965 – 1046	1046 – 1086
	<b>Střední <math>\lambda_t \left[ \frac{W}{m K} \right]</math></b>	0,10	41,04	0,09	0,20	0,15	0,54

<sup>14</sup> Sibralové rohože se působením dilatující vyzdívky stlačí

## 7 ZÁVĚR

### 7.1 Zhodnocení provedených prací

Práce sestává z několika dílčích částí – těmi jsou:

1. Rešerše problematiky roštového spalování a s ním spojené legislativy
2. Popis a užití výpočetního aparátu pro roštové spalovací komory a jeho úprava do návrhového výpočtu pro navrženou geometrickou koncepci
3. Sestavení programu pro prostředí Matlab R2020b, umožňujícího automatizaci celého výpočtu
4. Návrh a návrhový výpočet odvodu strusky
5. Návrh a návrhový výpočet izolace a vyzdívky
6. Vytvoření základní modelové a výkresové dokumentace tohoto zařízení

Byl proveden návrh provozních parametrů, rozměrový a tepelný výpočet uvažované roštové spalovací komory. Pro tepelný výpočet byla zvolena poloempirická Gurvičova metoda, dávající do souvislosti teplotu plamene a teplotu na výstupu z ohniště. Geometrie spalovací komory byla uvažována tak, aby odpovídala známým požadavkům dle rešerše. Zejména vratné klenby ohniště jsou uvažovány jako tepelná zrcadla pro sušení a horní zápal přiváděného paliva. Dolní zápal není uvažován jako směrodatný, nicméně je ulehčen recirkulací generovaných spalin pod rošt.

Díky automatizaci všech výpočtů měl autor možnost zkoušet různé kombinace palivových mixů a vstupních parametrů.

Rošt je navržen posuvný s občasným pohybem, chlazený vzduchem. Plnění ohniště je řešeno hydraulickým tlačáním sypkého paliva dávkovacím kanálem na horním konci roštu. Odvod strusky v tomto případě obstarává šnekový dopravník, dimenzovaný na návrhovou kapacitu ohniště.

Vyzdívka je vrstvená, navržená s ohledem na fyzikální odolnost a izolační vlastnosti jednotlivých vrstev. Izolace je dimenzována na normalizovanou dotykovou teplotu vnějšího povrchu.

## 7.2 Budoucí práce

Návrhový výpočet nastíněný v této práci je sestaven tak, aby umožnil automatizaci procesu. Již je představen prototyp výpočetního programu pro prostředí Matlab R2020b, umožňující základní návrh spalovacího zařízení v závislosti na vstupech, jako je složení paliv ve směsi, podíly složek směsi; teplota, vlhkost a přebytek spalovacího vzduchu; požadovaný parní výkon; podíl recirkulace, apod.

Program je momentálně ve fázi, kdy zvládá návrh pouze pro jednu stanovenou výchozí geometrii, jeho možnosti v této oblasti plánuje autor dále rozvíjet. Stejně tak bude program přepracován do vhodnější formy (např. proto, že Matlab není vhodné prostředí pro výpočty v inženýrské praxi v malé firmě) a rozšířen o submodely nabízející projektantovi ještě širší uchopení problematiky návrhu roštového spalovacího zařízení.

Používaná Gurvičova metoda byla sice užita pro návrhy většiny ohnišť pro pevná paliva v ČR, nicméně je odvozena primárně z dat naměřených na středních a velkých ohništích. Aplikace pro menší ohniště a ohniště se složitější geometrií může být ošidná, neboť používané doporučené koeficienty může být třeba rozšířit o koeficienty opravné.

Dalším krokem, který se nabízí je získání přesných provozních dat z existujících zařízení (zejména použití přesných průtokoměrů) a provedení validace výpočtů – praktické využití je totiž oprávněné až ve chvíli, kdy není pochybnost o žádném z výsledků.

Pro praxi by měl být model rozšířen o lepší postihu přenosu tepla do membránové stěny a pokud možno připojit i model následujícího parního kotle. V současné době je návrhový výpočet sestaven pro značně zjednodušenou geometrii, bylo by vhodné vytvořit obdobné nástroje pro komplexnější geometrie a implementovat je do průběžně vytvářeného výpočetního programu.

Zde uveřejněný postup nabízí projekční přístup na úrovni zařízení, další postup by se měl zabývat i nižší úrovní a věnovat se zvláště jeho jednotlivým detailům.

Základem výpočtu je vždy elementární složení paliv. Budoucím krokem je tedy i vytvoření databáze typických složení prakticky uvažovatelných paliv.

Pro případ, kdy není možné při návrhu vycházet ze známého elementárního složení palivové směsi – například pokud je u spalovaného odpadu znám pouze poměr okem rozpoznatelných složek, by měl být model rozšířen o dostatečně spolehlivý bilanční nástroj schopný pracovat se zadáním v této podobě.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] OCHRANA, Ladislav. *Kotle průmyslových tepelných centrál*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1990. ISBN 80-214-0223-7.
- [2] RYBÍN, Miroslav. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1985. ISBN 04-227-85.
- [3] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. třetí vydá. Brno: VUT v Brně, 2019. ISBN 978-80-214-5769-0.
- [4] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. *Kotle - 2. část. tzb-info* [online]. 2012 [vid. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [5] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983.
- [6] OBROUČKA, Karel. *Termické odstraňování a energetické využívání odpadů*. 1. vydání. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 80-248-0009-8.
- [7] ČSN 06 3090. *Zařízení pro termické odstraňování/zneškodňování a energetické využívání odpadů*. 2007
- [8] HÜBLOVÁ, Martina. *Srovnání výhod a nevýhod jednotlivých druhů termického zpracování odpadů* [online]. B.m., 2009. VŠB Ostrava. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/71844/HUB109\\_FS\\_B2341\\_3904R016\\_2009.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/71844/HUB109_FS_B2341_3904R016_2009.pdf?sequence=1)
- [9] LIBICH, Vladimír a Ladislav OCHRANA. *Spalovací zařízení a výměníky tepla*. 2. vyd. Brno: VUT v Brně, 1989. ISBN 80-214-1078-7.
- [10] SAKO BRNO. *Energetické využití odpadu* [online]. 2018 [vid. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.sako.cz/pro-brnaky/cz/801/energeticke-vyuziti-odpadu/>
- [11] HERGOTT, Martin. Technologie MARTIN pro spalovnou SAKO Brno – vratisuvný spalovací rošt. *All for power* [online]. 2011, 40–41. Dostupné z: [http://old.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/rost\\_martin\\_sako\\_web.pdf](http://old.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/rost_martin_sako_web.pdf)
- [12] BABCOCK & WILLCOX VØLUND. *21' Century Advanced Concept for Waste-Fired Power Plants* [online]. 2012. Dostupné z: <https://www.babcock.com/-/media/volund/volund-documents/advanced-concept-for-waste-fired-power-plants.ashx?la=en&hash=A29C3F9407E90960105968AE35C26EFD1284C11F>
- [13] KITTO, John B., M.D. FICK, Larry A. HINER a W.J. ARVAN. World-Class Technology for the Newest Waste-to-Energy Plant in the U.S. – Palm Beach Renewable Energy Facility No. 2. In: *Renewable Energy World International* [online]. 2016 [vid. 2021-03-23]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/319688780\\_World-Class\\_Technology\\_for\\_the\\_Newest\\_Waste-to-Energy\\_Plant\\_in\\_the\\_US\\_-\\_Palm\\_Beach\\_Renewable\\_Energy\\_Facility\\_No\\_2](https://www.researchgate.net/publication/319688780_World-Class_Technology_for_the_Newest_Waste-to-Energy_Plant_in_the_US_-_Palm_Beach_Renewable_Energy_Facility_No_2)
- [14] MARTIN GMBH. *Component lot supplier* [online]. [vid. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.martingmbh.de/en/waste-to-energy.html>

- [15] BABCOCK & WILLCOX. *Sustainable, Clean Energy from Waste* [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.babcock.com/-/media/documents/resources/renewables/e101-3241-waste-to-energy.ashx>
- [16] BABCOCK & WILCOX VØLUND. *B&W Vølund DynaGrate®* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=bISfP0s0A64>
- [17] VYNCKE. *Our combustion technology* [online]. [vid. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.vyncke.com/solutions/our-combustion-technology/>
- [18] ŠEVELOVÁ, Kamila, Kamil STÁREK, Ivo BERKA, Jan HEROSCH a Petr SALVET. *Parní kotle* [online]. Ostrava: Učební texty VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/414/parni-kotle.pdf>
- [19] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I. 2. vydání*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2550-2.
- [20] LECKNER, Bo a Fredrik LIND. Combustion of municipal solid waste in fluidized bed or on grate – A comparison. *Waste Management* [online]. 2020, **109**, 94–108. ISSN 18792456. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2020.04.050
- [21] EUROPEAN COMMISSION. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration* [online]. Brusel: European Union. 2019. ISBN 9789279940385. Dostupné z: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI\\_BREF\\_FD\\_Black\\_Watermark.%0A.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI_BREF_FD_Black_Watermark.%0A.pdf)
- [22] URBAN, Lukáš. *TECHNOLOGICKÁ JEDNOTKA PRO TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ BIOMASY*. B.m., 2009. VUT v Brně.
- [23] HANUS, Jan. *Systémové řešení pro energetické využití zdravotnických odpadů*. B.m., 2019. VUT v Brně.
- [24] YIN, Chungen a Shuangshuang LI. Advancing grate-firing for greater environmental impacts and efficiency for decentralized biomass/wastes combustion. *Energy Procedia* [online]. 2017, **120**, 373–379. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.07.220
- [25] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. 4. vyd. Brno: VUT v Brně, 1992.
- [26] VALOŠEK, Daniel, Martin BYRTUS a Pavel MIL. *Metodika konstruování v oboru* [online]. Ostrava: Učební texty VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/414/metodika-konstruovani-v-oboru.pdf>
- [27] CHEREMISINOFF, Paul. *Waste incineration handbook*. 1. B.m.: Butterworth-Heinemann Ltd, 1993. ISBN 0-7506-0282-1.
- [28] KRÁL, Ondřej. *Návrh roštového kotle s přirozenou cirkulací na spalování kontaminovaného dřeva*. B.m., 2017. Vysoké učení technické v Brně.
- [29] REISKUP, Matěj. *Návrh spalovenského kotle na spalování směsného komunálního odpadu*. B.m., 2016. VUT v Brně.
- [30] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Třetí vydá. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [31] KROPÁČ, Jiří. *Technicko-ekonomická analýza dat z provozu moderní spalovny komunálních odpadů*. B.m., 2008. VUT v Brně.

- [32] ČESKO. *Zákon č. 201/2012 Sb. ze dne 13.06.2012 o ochraně ovzduší* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [33] FRASSOLDATI, A., S. FRIGERIO, E. COLOMBO, F. INZOLI a T. FARAVELLI. Determination of NO<sub>x</sub> emissions from strong swirling confined flames with an integrated CFD-based procedure. *Chemical Engineering Science* [online]. 2005, **60**(11), 2851–2869. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2004.12.038
- [34] ANSYS. *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide* [online]. [vid. 2021-02-21]. Dostupné z: [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm)
- [35] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II*. 2. vydání. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1716-3.
- [36] KROPÁČ, Jiří. *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh systému čištění spalin z procesu termického zpracování odpadů* [online]. B.m., 2012. VUT v Brně. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/3571>
- [37] HORÁK, J., F. HOPAN, M. ŠYC, P. MACHÁLEK, K. KRPEC, T. OCELKA a T. TOMŠEJ. Bilance emisí znečišťujících látek z malých zdrojů znečišťování se zaměřením na spalování tuhých paliv. *Chemické Listy*. 2011, **105**(11), 851–855. ISSN 00092770.
- [38] STRNAD, Ondřej. *Emise tuhých znečišťujících látek* [online]. B.m., 2018. VUT v Brně. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=173994](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173994)
- [39] *Směrnice Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadů* [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0031>
- [40] *Rozhodnutí Rady 2003/33/ES ze dne 19. prosince 2002, kterým se stanoví kritéria a postupy pro přijímání odpadů na skládky podle článku 16 a přílohy II směrnice 1999/31/ES* [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/cs/TXT/?uri=CELEX%3A32003D0033>
- [41] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic* [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>
- [42] *Rozhodnutí Komise 2014/955/EU ze dne 18. 12.2014 , kterým se mění rozhodnutí 2000/532/ES o seznamu odpadů podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES*
- [43] *Směrnice Komise (EU) 2015/1127 ze dne 10. července 2015, kterou se mění příloha II směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech a o zrušení některých směrnic (Text s významem pro EHP)* [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX%3A32015L1127>
- [44] ČESKO. *Zákon č. 541/2020 Sb. ze dne 23.12.2020 o odpadech* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>
- [45] ČESKO. *Vyhláška č. 415/2012 Sb. ze dne 30.11.2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>

- [46] KLIMEK, Petr. *Hodnocení efektivitu využití odpadů k výrobě energie* [online]. B.m., 2010. VUT v Brně. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=30113](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30113)
- [47] KRIŠPÍN, Jan. *Moderní jednotka pro energetické využití odpadů o střední kapacitě*. B.m., 2017. VUT v Brně.
- [48] ČSN EN 746-2. *Bezpečnostní požadavky na zařízení ke spalování a manipulaci s palivy*. 2011
- [49] ČSN 07 0010. *Základní parametry a výkony pro parní kotle stabilní*. 1967
- [50] ČSN 07 0620. *Konstrukce a výstroj parních a horkovodních kotlů*. 1978.
- [51] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění)* [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex%3A32010L0075>
- [52] IBLER, Zbyněk. *Možnosti rozvoje výroby tepla a elektřiny využitím biomasy v regionech a městech ČR*. 2003.
- [53] KOLÁŘOVÁ, M., J. MAZANCOVÁ, P. JEVIČ a P. HUTLA. Tuhé alternativní palivo s biomasou. *Zemědělská technika a biomasa 2007* [online]. 2007, 62–67. Dostupné z: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2007/092.pdf>
- [54] JECHA, David. *Technologické linky zpracovatelského průmyslu: Spalování fosilních paliv, Přednáška ÚPI FSI VUT*. 2019
- [55] ČSN 07 0305. *Hodnocení kotlových ztrát*. 1984
- [56] ČSN EN 12952. *Vodotrubné kotle a pomocná zařízení*. 2002.
- [57] MALÍKOVÁ, Veronika. *Roštový kotel na spalování dřevní štěpky a tříděného odpadu 50 t/h*. B.m., 2020. VUT v Brně.
- [58] VRÁNA, Jakub. *Roštový kotel na spalování dřevní štěpky a kontaminované biomasy*. B.m., 2020. VUT v Brně.
- [59] ČMELÍK, Milan, Zdislav. ŠÍMA a Lubor MACHONSKÝ. *Fyzikální tabulky*. B.m.: Technická univerzita, Pedagogická fakulta, 2001. ISBN 9788070835159.
- [60] MEDEK, Jaroslav. *Mechanické pochody*. 3. přep. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 1998. ISBN 80-214-1264-X.
- [61] ČSN EN ISO 6708. *Potrubní části. Definice a výběr jmenovitých světlostí DN*. 1996.
- [62] PERIL PRODUCTION, s.r.o. *Tvarovky PERIL* [online]. Dostupné z: <https://www.ekatalog.cz/firma/156178-peril-production-sro/>
- [63] UNIFRAX. *Fibraflex Durablanket S, katalog* [online]. Dostupné z: <http://www.inheat.cz/doc/td/cz/39/fiberfrax-durablanket-s-cz.pdf>
- [64] HAŠEK, Pavel. *Tabulky pro tepelnou techniku*. 2. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1980.
- [65] SPALDING, D. Brian a Jerry TABOREK. *Heat exchanger design handbook*. B.m.: Hemisphere Publishing Corp., 1983. ISBN 3-1841-9081-1.

- [66] GHAJAR, Afshin a Yunus CENGEL. *Heat and Mass transfer - fundamentals and application*. 6. vydání. New York: McGraw-Hill Education, 2020. ISBN 9780077366643.
- [67] INCROPERA, Frank P., David P. DEWITT, Theodore L. BERGMAN a Adrienne S. LAVINE. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. vydání. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007. ISBN 0-471-45728-0.
- [68] JEGLA, Zdeněk. *Podklady k předmětu Navrhování procesních a energetických systémů*. 2019.
- [69] P-D REFRACTORIES CZ A.S. *Žárovzdorné výrobky* [online]. 2010. Dostupné z: <http://www.pd-refractories.cz/files/files/vyroby/781.pdf>
- [70] PROMAT, s.r.o. *PROMAGLAF HTI 1200 - technické údaje* [online]. 2013. Dostupné z: <https://ww3.promatpraha.cz/ke-stazeni/>
- [71] UNIFRAX. *Fiberfrax Durablanket* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.unifrax.com/product/fiberfrax-durablanket-s/>
- [72] PÁVKOVÁ, Naďa, Josef FORMÁNEK a Jaroslav KALINA. *Izolační žárobetony v pecích na výpal keramiky*. 2022.
- [73] KERATECH, s.r.o. *Žárovzdorné materiály - tvarovky* [online]. Dostupné z: <http://www.keratech.cz/zaruvzdorne-materialy/tvarovky/odlehcene-mulitove-a-perlitove-cihly/>
- [74] PROMAT, s.r.o. *Vysokoteplotní konstrukční a izolační materiály* [online]. 2014. Dostupné z: <https://www.promat.tech/hti2014/index.html#80>
- [75] PRŮMYSLOVÁ KERAMIKA, s.r.o. *Průmyslová keramika - katalog* [online]. 2022. Dostupné z: <https://disk.cpilot.cz/prumker/2019/03/AWmZ5jZk9DhgE-FY4kfB.pdf>
- [76] TACHTECH, S.r.o. *Žárovzdorné izolační cihly JM* [online]. 2022. Dostupné z: <http://www.tachtech.cz/materialy/cz/produkty/zaruvzdorne-materialy/zaruvzdorne-cihly/113-zaruvzdorne-izolacni-cihly-jm.html>
- [77] ROCKWOOL, a.s. *Technické izolace - katalog* [online]. 2010. Dostupné z: [http://rwiumbracocz.inforce.dk/media/238212/technicke\\_izolace.pdf](http://rwiumbracocz.inforce.dk/media/238212/technicke_izolace.pdf)
- [78] E-KONSTRUKTÉR. *Vlastnosti vzduchu* [online]. 2016. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/vlastnosti-vzduchu>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

A	Popelovina v palivu	hm. %
b	Měrná spotřeba tepla (podpůrného paliva)	kW/kg
$B_p$	Hm. Zlomek hořlaviny v palivu	1
$B_{p,d}$	Tok podpůrného paliva	kg/h
$B_o$	Boltzmannovo podobnostní číslo	-
$C_h$	Uhlík v hořlavině	hm. %
$c_i$	Měrná tepelná kapacita	kJ/kg.K
$c_p$	Měrná střední tepelná kapacita složky spalin	kJ/mN <sup>3</sup> .K
$C^r$	Uhlík v palivu	hm. %
$Cl_h$	Chlor v hořlavině	hm. %
CFD	Computational fluid dynamics	-
csv	Textový formát pro tabulky s hodnotami oddělenými čárkou	-
dark	Stupeň černosti	-
$E_{SP}$	Tepelná jímavost spalin	kJ/kg.K
$F_h$	Fluor v hořlavině	hm. %
$H_h$	Vodík v hořlavině	hm. %
$H_{korig}^r$	Vodík v palivu (korigovaný o část tvořící halogenvodíky)	hm. %
$H_p$	Hm. Zlomek vodíku v palivu	1
$H^r$	Vodík v palivu	hm. %
HHV	Spalné teplo (higher heating value)	kJ/kg
$HHV_h$	HHV hořlaviny	kJ/kg
hm. %	Hmotnostní procento	hm. %
$i_{nv}$	Měrná entalpie napájecí vody	kJ/kg
$i_{pp}$	Měrná entalpie páry	kJ/kg
$I_{spal,min}^t$	Entalpie stechiometrického množství spalin	kJ/kg
$I_{spal}^{t,\alpha}$	Entalpie spalin při teplotě t a přebytku vzduchu	kJ/kg
$I_{vzd,min}^t$	Entalpie minimálního množství vzduchu	kJ/kg
$k_{sal}$	Součinitel zeslabení sálání	1/m.MPa
LHV	Výhřevnost (lower heating value)	kJ/kg
$LHV_h$	LHV hořlaviny	kJ/kg
M	Součinitel M (tepelný výpočet)	-
$M_c$	Hmotnost vsázky (paliva)	kg
$M_i$	Molární hmotnost prvku uvedeného v indexu	kg/kmol
$M_o$	Hodinový spalovací výkon	kg/h
$m_o$	Měrný plošný výkon pece	kg/h.m <sup>2</sup>
$M_p$	Tok přiváděného paliva	kg/s
$M_{pp}$	Parní výkon kotle	kg/s

$M_{SP}$	Průtok spalin dohořivací komorou	$m^3/s$
$m_v$	Měrný objemový výkon pece	$kg/h \cdot m^3$
$N_h$	Dusík v hořlavině	hm. %
$NO_x$	Obecný oxid dusíku (NO, NO <sub>2</sub> )	-
$O_{2,air,min}$	Minimální množství kyslíku potřebného ke spalování	$mN^3/kg$
$O_{2,air}^S$	Kyslík v suchém vzduchu	obj. %
$O_{air,min}$	Minimální množství vlhkého vzduchu	$mN^3/kg$
$O_{air,min}^S$	Minimální množství suchého vzduchu ke spalování	$mN^3/kg$
$O_{Ar}$	Měrný objem Ar ve spalinách	$mN^3/kg$
$O_{CO_2}$	Měrný objem CO <sub>2</sub> ve spalinách	$mN^3/kg$
$O_h$	Kyslík v hořlavině	hm. %
$O_{H_2O}$	Měrný objem vodní páry ve spalinách	$mN^3/kg$
$O_{N_2}$	Měrný objem N <sub>2</sub> ve spalinách	$mN^3/kg$
$O^f$	Kyslík v palivu	hm. %
$O_{SO_2}$	Měrný objem SO <sub>2</sub> ve spalinách	$mN^3/kg$
$O_{SP}$	Skutečné množství vlhkých spalin	$mN^3/kg$
$O_{sp,min}$	Minimální množství vlhkých spalin	$mN^3/kg$
$O_{sp,min}^S$	Minimální množství suchých spalin	$mN^3/kg$
$O_{SP}^S$	Skutečné množství suchých spalin	$mN^3/kg$
$p''$	Tlak syté páry	kPa
$p_c$	Celkový tlak spalovacího vzduchu	kPa
$p_s$	Poměr sušící délky k délce roštu	-
$Q_c^i$	LHV hořlaviny v tuhých zbytcích	$kJ/kg$
$Q_{n,p,d}$	Teplo z podpůrného paliva	$kW/kg$
$Q_p^p$	Přivedené teplo v palivu (LHV)	$kJ/kg$
$q_s$	Tepelné zatížení roštu	$MW/m^2$
$Q_z$	Ztrátový tepelný tok	$kW$
$q_{zd}$	Měrný ztrátový tok povrchem pece	$W/m^2$
$R_1$	Kritérium energetické účinnosti dle 541/2020 Sb.	-
$r_{H_2O}$	Výparné teplo vody	$kJ/kg$
$S_{celk}$	Celkový vnitřní povrch ohniště - hranice aktivního objemu	$m^2$
$S_h$	Síra v hořlavině	hm. %
$S^r$	Plocha roštu	$m^2$
$S_{spal}^f$	Spalitelná síra v palivu	hm. %
$SNCR$	Selektivní nekatalitická redukce	-
$t$	Teplota	$^{\circ}C$
$t_A$	Teplota měknutí popela	$^{\circ}C$
$t_{adiabatic}$	Adiabatická teplota plamene	$^{\circ}C$
$t_{kp}$	Teplota spalin v komíně	$^{\circ}C$
$t_{ok}$	Teplota ve výstupním okně dohořivací komory	$^{\circ}C$
$t_{vz}$	Teplota spalovacího vzduchu	$^{\circ}C$

$t_{\text{vzduch}}$	Teplota vzduchu z okolí	$^{\circ}\text{C}$
TZL	Tuhé znečišťující látky	-
$V_{\text{H}_2\text{O}}$	Objemový poměr vlhkosti ve vzduchu	$\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{s.vzd.}}$
$V_{\text{m}}$	Standardní molární objem plynu	$\text{mN}^3/\text{kmol}$
$V_{\text{o}}$	Aktivní objem ohniště	$\text{m}^3$
W	Vlhkost v palivu	hm. %
$W_{\text{p}}$	Hm. Zlomek vlhkosti v palivu	1
$x_{\text{i}}$	Podíl celkového popela v daném druhu tuhých zbytků	hm. %
$x_{\text{t}}$	Poměrná výška maximální teploty plamene	m
$Z_{\text{C}}$	Ztráta mechanickým nedopalem - nepřímý výpočet	%
$Z_{\text{CO}}$	Ztráta chemickým nedopalem - nepřímý výpočet	%
$Z_{\text{f}}$	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků - nepřímý výpočet	%
$Z_{\text{K}}$	Ztráta citelným teplem spalin - nepřímý výpočet	%
$Z_{\text{s}}$	Ztráta sdílením do okolí - nepřímý výpočet	%
ZEVO	Zařízení pro energetické využití odpadu	-
$\alpha$	Součinitel přebytku vzduchu	1
$\eta$	Termická účinnost	%
$\xi$	Součinitel zanesení stěn	-
$\rho$	Sypná hmotnost paliva	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\zeta_{\text{C}}$	Ztráta mechanickým nedopalem - přímý výpočet	-
$\zeta_{\text{CO}}$	Ztráta chemickým nedopalem - přímý výpočet	-
$\zeta_{\text{fyz}}$	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků - přímý výpočet	-
$\zeta_{\text{K}}$	Ztráta citelným teplem spalin - přímý výpočet	-
$\zeta_{\text{s}}$	Ztráta sdílením do okolí - přímý výpočet	-
$\tau$	Zadržná doba	s
$\varphi$	Relativní vlhkost spalovacího vzduchu	%
$\varphi_{\text{t}}$	Součinitel uchování tepla	-
$\psi$	Součinitel tepelné efektivity stěn	-

# 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

## 10.1 Obrázky

Obrázek 1: a) ohniště s jedním ohniskem hoření; b) ohniště se dvěma ohnisky hoření [5]	13
Obrázek 2: Konstrukční typy roštů s občasným posouváním paliva: a) přesuvný rošt, b) protiběžný přesuvný rošt, c) vratisuvný rošt, d) válcový rošt.....	14
Obrázek 3: Kaskádový vratisuvný rošt a jeho princip.....	16
Obrázek 4: Výkyvný rošt B&W Vølund Dynagrate [16] .....	17
Obrázek 5: Přední klenba jako tepelné zrcadlo .....	19
Obrázek 6: Geometrie ohniště vhodných pro paliva dle podílu těkavých hořlavin; a) protiproudé ohniště, b) středoproudé ohniště, c) souproudé ohniště.....	20
Obrázek 7: Fáze hoření na roštu .....	22
Obrázek 8: Koncept geometrie spalovací komory (vstup pro skript) .....	38
Obrázek 9: Geometrie navržená přiloženým skriptem pro vybrané parametry (dosazený výpočet viz níže).....	39
Obrázek 10: Uživatelské rozhraní pro výběr složek palivové směsi .....	40
Obrázek 11: Rozměry a úhly zadní klenby.....	56
Obrázek 12: Rozměry a úhly ohniště.....	57
Obrázek 13: Dílčí plochy boku ohniště.....	60
Obrázek 14: Vizualizace vypočtené spalovací komory .....	66
Obrázek 15: Řez ohništěm a sestavou roštu .....	67
Obrázek 16: Řez spalovacím zařízením .....	68
Obrázek 17: Prostup tepla vrstvami vyzdívky – zjednodušené schéma.....	73

## 10.2 Grafy

Graf 1: Produkce NO <sub>x</sub> v závislosti na teplotě [36] .....	27
Graf 2: I-t diagram spalin pro počítané zařízení (průsečíky značí teoretickou a adiabatickou teplotu plamene) .....	48
Graf 3: Grafické znázornění průběhu teplot vyzdívkou a izolací – ohniště (popis vrstev viz tab. 14) .....	79
Graf 4: Grafické znázornění průběhu teplot vyzdívkou a izolací - dohořivací komora (popis vrstev viz tab. 14).....	79

## 11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Specifické emisní limity pro zařízení spalující biomasu [45] .....	32
Tabulka 2: Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně kontinuálním měřením [45] .....	33
Tabulka 3: Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně jednorázovým měřením [45] .....	33
Tabulka 4: Vysvětlivky k proměnným ve vzorci 4.2 .....	34
Tabulka 5: Hodnoty $C_{proc}$ pro spalovací stacionární zdroje [45].....	35
Tabulka 6: Parametry uvažované při návrhovém výpočtu zařízení pro volenou palivovou směs .....	36
Tabulka 7: Výsledná palivová směs při ukázkovém výpočtu.....	37
Tabulka 8: Složení dílčího paliva - dřevní štěpka.....	37
Tabulka 9: Složení dílčího paliva - TAP .....	37
Tabulka 10: Data pro interpolaci funkce $f$ , pro přepočet suchého na vlhký vzduch [33]	43
Tabulka 11: Dopočtené hodnoty, lze nalézt v protokolu v příloze ( <i>příloha 2</i> ) .....	65
Tabulka 12: Koeficienty pro odhad Nusseltova čísla [64] .....	74
Tabulka 13: Tepelné vodivosti vybraných izolačních materiálů.....	75
Tabulka 14: Fyzikální vlastnosti vzduchu [74] .....	77
Tabulka 15: Rozpis navržené izolace a vyzdívky.....	80

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1**      Výkresová dokumentace
- Příloha 2**      Ukázka výstupního protokolu
- Příloha 3**      Zjednodušený vývojový diagram výpočetního skriptu
- Příloha 4**      Disk s el. verzí práce, modely