



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

KONCEPCE INTEGROVANÝCH ZAŘÍZENÍ PRO JEDNOTKY „WASTE-TO-ENERGY“

CONCEPTS OF AN INTEGRATED EQUIPMENT FOR WASTE-TO-ENERGY UNITS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zuzana Petrasová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Studentka:	Bc. Zuzana Petrasová
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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:

Koncepce integrovaných zařízení pro jednotky „waste-to-energy“

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem práce je formou studie identifikovat na konkrétní jednotce „waste-to-energy“ pro termické zpracování plyných odpadů přínosné a potenciálně realizovatelné koncepce integrovaných zařízení a na základě dostupných informací analyzovat jejich technický, ekonomický a environmentální potenciál.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámit se s technologickým schématem a aparátovou skladbou průmyslové jednotky „waste-to-energy“ pro termické zpracování plyných odpadů a s výsledky studie zvyšování efektivity využití odpadního tepla této jednotky.
2. Seznámit se s konstrukčními možnostmi a provozními podmínkami současných moderních integrovaných zařízení pro technologie termického zpracování plyných odpadů realizovaných či vyvíjených na Ústavu procesního inženýrství.
3. S pomocí nabytých znalostí identifikovat a definovat přínosné a potenciálně realizovatelné koncepce integrovaných zařízení aplikovatelné do předmětné technologické jednotky za účelem zvýšení efektivity využití odpadního tepla.
4. Provést rozbor realizačně-technických, ekonomických a environmentálních efektů těchto slibných koncepcí integrovaných zařízení a na základě obdržných výsledků doporučit nejvhodnější z nich pro předmětnou jednotku.

Seznam doporučené literatury:

STEHLÍK P., Up-to-Date Waste-to-Energy Approach. From Idea to Industrial Application, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, Springer Nature, Switzerland, 2016.

VDI-Gessellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen Ed., VDI Heat Atlas, Second Edition,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá konstrukčními úpravami zkoumané průmyslové jednotky „waste-to-energy“ a možným nasazením moderních integrovaných zařízení namísto stávajících aparátů, které by snížily ekonomické nároky a vylepšily environmentální dopady provozu termického zpracování plyných odpadů za účelem zvýšení efektivity využití odpadního tepla. V rámci uvažovaných úprav jsou představeny možné modifikace procesu dle současných technologických trendů. Pro všechny řešené aparáty byly stanoveny investiční náklady dle cenových nabídek dodavatelů v souladu s odbornou literaturou, která se zabývá ekonomickým hlediskem během fáze syntézy a výběru nejvhodnější koncepce z pohledu investora. Pro hodnocení jednotlivých modifikací je využito kritérium Venture Profit jako míra ziskovosti daného provozu. Výstupem práce je určení optimální modifikace pro daný proces na základě zmíněného kritéria.

Klíčová slova

Průmyslová jednotka „waste-to-energy“, modifikace procesu, termické zneškodňování plyného odpadu, míra ziskovosti

Abstract

The diploma thesis deals with design modifications of the investigated industrial „waste-to-energy“ unit and possible deployment of modern integrated equipment instead of existing devices that would reduce economic demands and improve environmental impacts of thermal treatment of gaseous waste in order to increase thermal efficiency. Within the considered modifications, possible modifications of the process according to current technological trends are presented. For all solved devices, investment costs were determined according to the price offers of suppliers in accordance with professional literature, which deals with the economic aspect during the phase of synthesis and selection of the most suitable concept from the investor's point of view. The Venture Profit is used as a measure of the profitability of a given operation to evaluate individual modifications. The output of the thesis is to determine the optimum modification for the process based on the mentioned criteria.

Keywords

Waste-to-energy unit, process modification, thermal disposal of gaseous waste, profitability rate

Bibliografická citace

PETRASOVÁ, Zuzana. *Koncepce integrovaných zařízení pro jednotky „waste-to-energy“* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124470>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Jegly, Ph.D., s použitím literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů, svých vlastních poznatků získaných během studia a prostřednictvím odborných konzultací.

Poděkování

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Zdeňkovi Jeglovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, za jeho cenné rady, připomínky a návrhy v celém průběhu jejího vypracování. Rodině za celoživotní podporu. Tato práce je věnována člověku, který si ji už nestihl přečíst – mému tátovi Zdeňkovi Petrasovi.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Úvod do problematiky procesů termického zneškodňování plyných odpadů	2
1.2	Užití integrovaných zařízení	3
2	Moderní integrovaná zařízení (MIZ) realizovaná či vyvíjená na Ústavu procesního inženýrství	4
2.1	Integrované zařízení „koaxiál“	4
2.2	Integrované zařízení „regenerátor“	8
3	Popis zkoumané průmyslové jednotky „waste-to-energy“	10
3.1	Spalovací pec	11
3.1.1	Ukázka základního návrhu velikosti spalovací komory	13
3.2	Výparník	18
3.3	Přehřívák páry	18
3.4	Předehřívák odplynu	19
3.5	Tepelný výkon jednotlivých zařízení	21
4	Potenciální koncepce MIZ pro řešený proces	24
4.1	Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „koaxiál“	25
4.2	Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „kotel na odpadní teplo“	25
4.3	Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „žárotrubný kotel“	26
4.3.1	Omezení produkce syté páry	29
4.3.2	Žárotrubný kotel s přehřevem páry a předehřevem odplynu	31
4.4	Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „regenerátor“	32
4.5	Potenciál MIZ typu „spalovací ohříváč“	34
5	Hodnocení navržených modifikací procesu a koncepcí MIZ	36
5.1	Venture Profit jako kritérium hodnocení	36
5.2	Investiční náklady na jednotlivé aparáty	37
5.2.1	Investiční náklady na spalovací komoru	37
5.2.2	Investiční náklady na trubkový výměník	38
5.2.3	Investiční náklady na MIZ typu „koaxiál“	40
5.2.4	Investiční náklady na MIZ typu „žárotrubný kotel“	41
5.2.5	Investiční náklady na MIZ typu „regenerátor“	43
5.3	Hodnocení navrhovaných řešení	43
5.3.1	Venture Profit stávající provozované jednotky „waste-to-energy“	43
5.3.2	Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.1	44

5.3.3	Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.2	45
5.3.4	Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.3	45
5.3.5	Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.3.2	46
5.3.6	Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.4	46
5.4	Zhodnocení a výběr nejvhodnější modifikace jednotky „waste-to-energy“	47
6	Závěr	49
	Literatura	51
	Seznam tabulek	55
	Seznam obrázků	57
	Seznam symbolů a zkratk	59
	Seznam příloh	63

1 Úvod

S rostoucí kvalitou života roste i počet obyvatel na planetě, to znamená vyšší nároky na produkci ve všech průmyslových odvětvích, s kterou je úzce spjata vysoká spotřeba energie a tepla potřebná na provoz zařízení. Spotřebiteli jsou jak samotní obyvatelé, tak především průmyslové podniky po celém světě. V posledních desetiletích byl zaznamenán rapidní nárůst spotřeby energie v důsledku zvyšování produkce, současným trendem je tento růst zastavit a pokusit se o jeho kontinuální snižování v nadcházejících letech v souvislosti s negativními dopady na životní prostředí.

Množství vyrobeného tepla a energie především z fosilních zdrojů má svou produkcí CO_2 a dalších škodlivých plynů dopad na kvalitu životního prostředí a globální oteplování spadající svou důležitostí mezi velmi diskutovaná témata poslední doby. V oblasti ochrany životního prostředí je řešeno mnoho výzev.

Jedním z klíčových nástrojů by mělo být investování do realistických a udržitelných technologických řešení. Plány, postupy a cíle jsou vytyčeny v Klimaticko-energetickém rámci 2030 popsaném směrnicí Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/410 [1]. V něm jsou zahrnuty různé politické záměry, jako je snižování emisí skleníkových plynů, zajištění dodávek energie a podpora růstu, konkurenceschopnosti a vytváření pracovních míst díky vyspělým technologiím, nákladově efektivnímu přístupu a účinnému využívání zdrojů, při současném zvyšování podílu získávání energie z obnovitelných zdrojů a docílení úspor energie.

Úspory energie, globální oteplování a emise skleníkových plynů se staly hlavními technologickými, společenskými a politickými otázkami. Cílem je nyní přijít s řešeními, která sníží negativní dopady a budou schopná vyhovět přísným emisním standardům na cestě za uhlíkově neutrální společností, jak bylo stanoveno Pařížskou dohodou, kterou se zavázala plnit i Česká republika.

Existuje mnoho výrobních a zpracovatelských odvětví, která uvolňují významné množství emisí do atmosféry. Skleníkové plyny z průmyslového procesu lze snížit zavedením různých přístupů pro různé fáze zpracování [2]. Z toho důvodu se klade velký důraz na sledování nových trendů v oblasti intenzifikace, která má strategický význam pro zvýšení energetické účinnosti. Výzvy jsou zaměřovány na identifikaci a implementaci dlouhodobých řešení v oblasti výroby a následného zpracování, která jsou šetrná k životnímu prostředí, sociálně přijatelná a nákladově efektivní.

Diplomová práce se zabývá posledními trendy v oblasti technologií uplatitelných v provozech zabývajících se termickým zpracováním odpadu a efektivním využitím potenciálu odpadního tepla v procesu, aby nedocházelo k jeho zbytečným ztrátám. Představené koncepce řešení mohou být uplatnitelné i u dalších procesů řešících problematiku přenosu tepla a jeho intenzifikace.

Pro zvýšení míry využití odpadního tepla z těchto výrobních procesů, a tím zvyšování energetické účinnosti průmyslových linek, se do popředí dostává tepelná integrace procesů a intenzifikace tepelných zařízení.

Diplomová práce je zaměřena na konkrétní případ linky spalovny plyného odpadu a zabývá se problematikou jejich možných úprav. Záměrem je přitom identifikovat nejvhodnější využití tzv. integrovaných zařízení, jež umožní zvýšit efektivitu využití odpadního tepla a minimalizovat investiční náklady, ztráty tepla a zastavěnou plochu.

1.1 Úvod do problematiky procesů termického zneškodňování plyných odpadů

Procesní inženýrství se jako technický obor zaměřuje zejména na návrh průmyslových procesů a zařízení zaměřených na výrobu požadovaných produktů či zpracování surovin [3]. Pokrývá tak velké množství výrobních procesů z různých průmyslových odvětví od petrochemického průmyslu, přes chemický, potravinářský, farmaceutický až po zpracování odpadu a spousta dalších. Využívá přitom koncepci tzv. jednotkových operací. Na každý proces je pak nahlíženo jako na sekvenci jednotkových operací, které zajišťují náležitý stupeň konverze suroviny do požadovaného produktu. Pro příklad, jednotková operace "výměna tepla" je jednou ze základních jednotkových operací a je klíčovou pro většinu výrobních procesů. Každá jednotková operace pak může být zastoupena jedním aparátem, nebo skupinou zařízení.

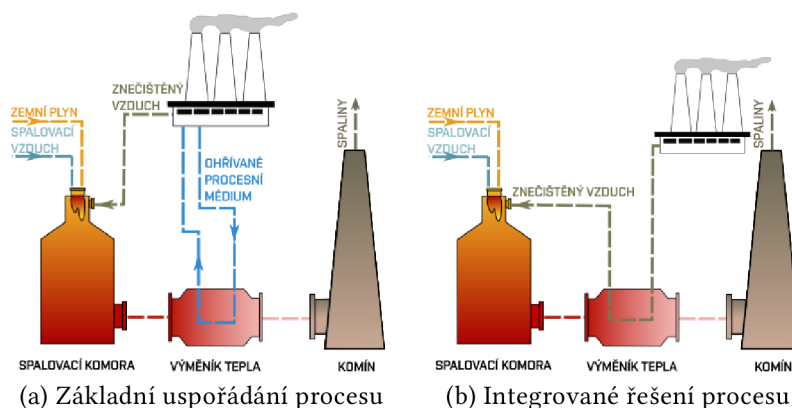
Pro provedení optimálního návrhu jsou následně využívány metody a systémové přístupy s cílem nalezení posloupnosti a vzájemného propojení jednotkových operací resp. procesních zařízení, které tyto operace zprostředkovávají [4]. Tyto techniky systémového procesního inženýrství jsou souhrnně označovány jako integrace procesů [5]. Hlavním úkolem integrace procesů je efektivní uspořádání operací, tedy i zařízení, které je provádějí, tak, aby celý proces byl navržen a provozován maximálně hospodárně a šetrně k životnímu prostředí.

Diplomová práce se zaměřuje na proces termického zneškodňování plyných odpadů. Rozdíl mezi základním versus integrovaným provedením takového procesu je představeno na příkladu procesu pro zneškodňování znečištěné vzdušiny. Tento proces je široce využíván nejen v průmyslové, ale i komerční sféře při termické likvidaci znečištěné vzdušiny např. z lakoven, lakýrnických dílen apod.

Výhodou procesu termického zneškodňování proudu znečištěného vzduchu s nízkými koncentracemi znečišťujících látek je jeho vysoká účinnost zneškodňování, tj. fakt, že produkované spaliny nemusí být dále dočišťovány a mohou být vypuštěny do atmosféry. Tento proces lze realizovat za pomoci dvou jednotkových operací – termické oxidace a výměny tepla. Každou jednotkovou operaci lze navíc realizovat jedním zařízením. Proces tedy tvoří tyto dvě zařízení:

- spalovací komora,
- výměník tepla.

Ve spalovací komoře probíhá termická oxidace znečištěného vzduchu, při čemž v ní musí být dosaženo předepsané teploty plynného prostředí v závislosti na obsahu polutantů a příslušné doby zdržení produkované plynné směsi (tj. spalin). Dosažení požadované teploty je typicky zajištěno spalováním zemního plynu jako paliva se spalovacím vzduchem v hořáku. V základním provedení takového procesu je potřeba tepelnou energii obsaženou ve spalinách opouštějící spalovací komoru využít v dalším zařízení pro zajištění hospodárnosti celého procesu. Takové základní uspořádání procesu je znázorněno na obrázku 1a. Integrované provedení procesu se pak zaměřuje na takové řešení, jež umožní minimalizovat spotřebu paliva při efektivním využití odpadního tepla spalin ze spalovací komory. Toho lze dosáhnout předebráním zneškodňované vzdušiny odpadním teplem spalin ze spalovací komory. Integrované provedení procesu znázorňuje obrázek 1b.



Obrázek 1: Základní a integrované uspořádání procesu termického zneškodňování znečištěné vzdušiny

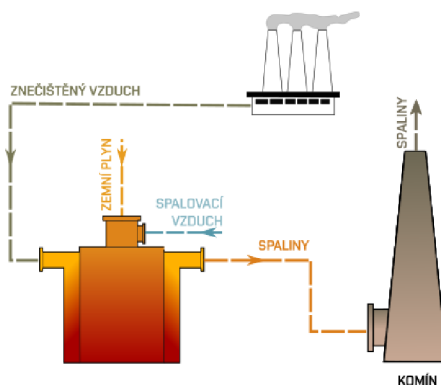
1.2 Užití integrovaných zařízení

V souvislosti s globálními změnami a potřebou maximálně energeticky účinných a ekologicky šetrných řešení výrobních procesů je zaváděn nový trend tzv. moderních integrovaných zařízení (MIZ). Ta je možné charakterizovat zejména multifunkčností díky seskupení většího množství operací do jediného aparátu, čímž se minimalizuje celkový počet zařízení v procesu. To ve výsledku přináší redukci jak investičních, tak i provozních nákladů, snížení ztrát tepla do okolí i snížení nároků procesu na zastavěnou plochu. Tím celý proces probíhá efektivněji a ekologičtěji.

Základními předpoklady dobrého návrhu MIZ jsou [3]:

- užití MIZ dodrží integrované řešení procesu,
- vlastní návrh MIZ slučuje okolní jednotkové operace do jednoho aparátu.

Aplikujme nyní tyto principy na zvolený integrovaný proces termického zneškodňování znečištěné vzdušiny na obrázku 1b. Cílem je navrhnout řešení, které nabídne kompaktnější provedení a zvládne kompenzovat funkčnost použitých zařízení, a tedy budou dvě zařízení nahrazena jedinou multifunkční jednotkou. Realizace takového MIZ je znázorněna na obrázku 2.



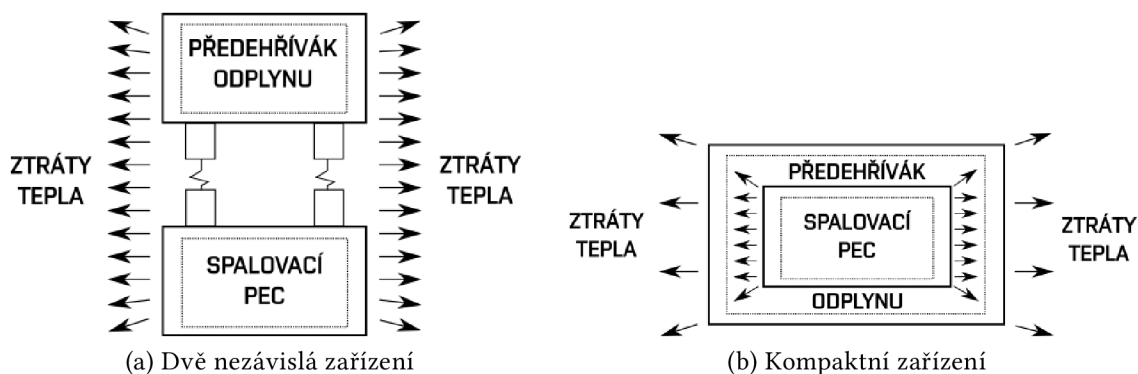
Obrázek 2: Příklad využití moderního integrovaného zařízení

2 Moderní integrovaná zařízení (MIZ) realizovaná či vyvíjená na Ústavu procesního inženýrství

Současným trendem v procesním inženýrství je nasazení MIZ v procesu. Kladeným cílem je zlepšení efektivity dodávek a využití energie, vody a dalších zdrojů při současném snižování emisí. V reakci na tyto průmyslové požadavky bylo zaměřeno značné výzkumné úsilí na Ústavu procesního inženýrství směrem k vývoji MIZ.

2.1 Integrované zařízení „koaxiál“

Prvním MIZ vyvíjeným na Ústavu procesního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně je „koaxiál“, který je složen z válcové spalovací komory uvnitř výměníku tepla sloužícího k předehřevu odplynu. Bližšímu popisu zařízení se věnuje odborný článek [6], ve kterém je porovnáno stávající uspořádání vůči novému originálnímu konstrukčnímu řešení, které dvě hlavní zařízení, spalovací komoru a výměník pro předehřev zpracovávaného odplynu, spojuje do jedné kompaktní jednotky.



Obrázek 3: Porovnání konvekčního a nového uspořádání

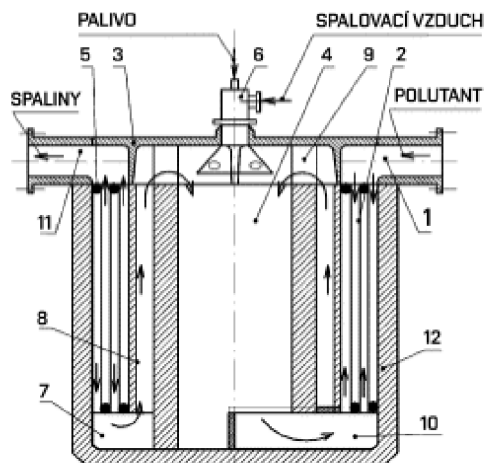
Schematické porovnání je znázorněno na obrázku 3. Jak ukazuje obrázek 3b dochází k eliminaci tepelných ztrát a teplo vzniklé spalováním je plně využito pro předehřev odplynu při nutnosti výstavby pouze tenké izolační vrstvy. Mezi další výhody je pak možné zařadit odstranění spojovacího potrubí a zmenšení zastavěné plochy.

Konstrukce zařízení spočívá v instalaci spalovací komory s hořákem uvnitř rekuperačního cylindrického výměníku s velkou a účinnou teplosměnnou plochou, která se skládá z několika sousedících plechových válců. Dochází tak ke snížení hmotnosti zařízení a zvýšení tepelné účinnosti v porovnání s konvekčním provedením při současném zmenšení rozměrů díky svému kompaktnímu řešení. Vyvinuté experimentální zařízení je zobrazeno na obrázku 4.

Vzhledem ke snížení tepelných ztrát a lepšímu využití tepla je minimalizováno množství potřebného paliva pro proces spalování. V některých případech lze počítat se samovolným průběhem procesu spalování, bez nutnosti přidávání paliva, v závislosti na typu a koncentraci škodlivých látek obsažených ve zpracovávaném plynu. Pak má hořák umístěný v horní části komory pouze stabilizační funkci.



Obrázek 4: Experimentální zařízení [6]



Pozice	Název
1	vstupní hrdlo do vstupní rozdělovací komory
2	výměník tepla - nerezové válcové plechy
3	víko
4	spalovací komora
5	půlkruhové těsnění
6	hořák
7	dolní obratová komora
8	prstencový prostor
9	lopatky víříče
10	rozdělovací komora spalin
11	horní výstupní komora s výstupním hrdlem
12	izolace

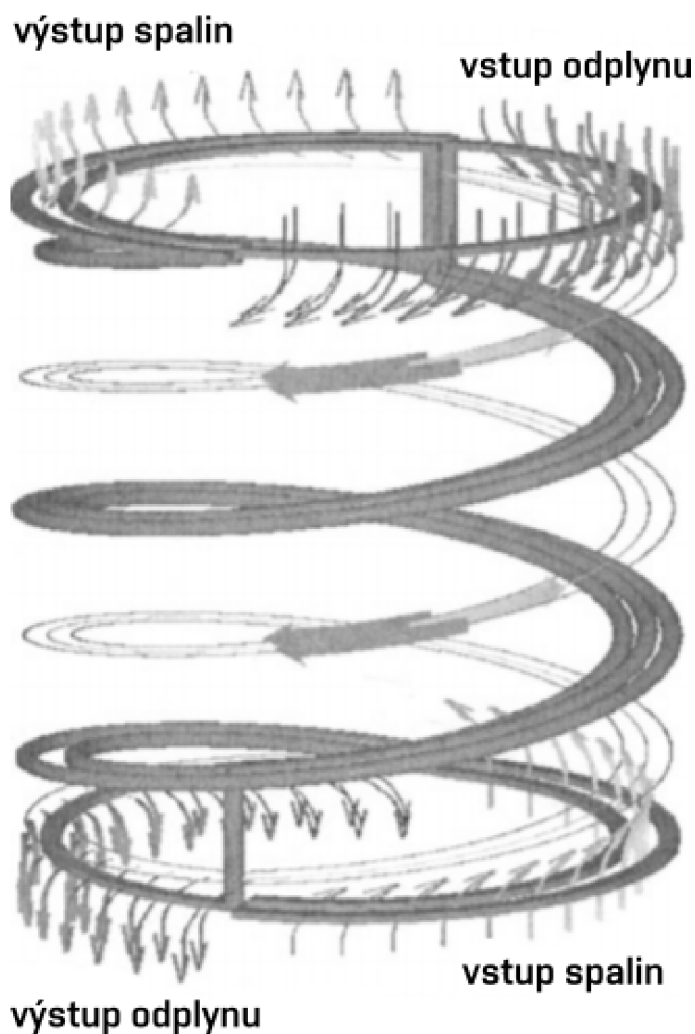
Obrázek 5: Řez zařízením [7]

Pro porozumění funkci zařízení je na obrázku 5 blíže popsán princip dle [7], který spočívá ve vhánění odpadního plynu skrz vstupní potrubí opatřené přírubovým spojem (1), následně prochází samotným výměníkem. Ten se skládá z několika soustředných válcových plechů (2), které zajišťují správný směr proudění přiváděného odplynu a odcházejících spalin, které jsou vzájemně odděleny půlkruhovým těsněním (5) pro zajištění správného vstupu, resp. výstupu, a zabránění promíchání obou médií. Na každém vnějším povrchu plechu jsou umístěna spirálovitě stočená žebra, která směřují odplyn do

spodní komory, odkud je veden prstencovým prostorem (8) do spalovací komory (4), která se nachází v jádru jednotky, s hořákem (6), který je upevněn v horní části víka (3), jehož funkcí je zabránit vstupující zpracovávané látce v přímém vstupu do spalovací komory. Současně je zabráněno úniku spalin do proudu odplynu přiváděného do spalovací komory, což by mělo za následek snížení účinnosti celého procesu. Lopatky (9) se starají o rovnoměrnou distribuci odplynu do spalovací komory. Spaliny jsou ze spalovací komory odváděny rozdělovací komorou (10) do výměníku, kde předávají svoje teplo přiváděnému odplynu. Mezi sousedními plechy stoupají spirálovitě vzhůru do výstupní větve zakončené přírubou (11). Spirálovitě stočená žebra mají ve výměníku dvě funkce:

- udržovat konstantní vzdálenost mezi kruhovými plechy;
- vytvářet obdélníkový kanál pro proudění média (o rozměrech $B \times h_c$, kde B je vzdálenost mezi dvěma sousedními kruhovými plechy a h_c udává vzdálenost mezi dvěma žebry).

Jejich detailní znázornění pro obě média s vyznačenými směry toku je provedeno na obrázku 6.



Obrázek 6: Proudění pracovních látek ve výměníku[8]

Ve výměníku dochází k zahřívání odplynu na teplotu, která se blíží bodu vznícení spalitelných složek obsažených v plynu. Ve spalovací peci dochází ke zvýšení teploty spalováním přídavného paliva v hořáku. Tím je dosaženo dostatečné teploty, současně přiváděním spalovacího vzduchu do komory jsou vytvořeny vhodné podmínky pro průběh spalování. Reálné spalování paliv probíhá vždy za určitého přebytku spalovacího vzduchu, než je teoreticky navrhováno. Běžné přebytky spalovacího vzduchu v zařízeních spalujících plynné pracovní látky jsou uváděny v závislosti pro daný typ hořáku, obecně je uváděno pro moderní typy $\alpha = 1,02 \div 1,05$, jak uvádí [9]. Spalování nelze provádět za přísně stechiometrické spotřeby vzduchu, protože by nedocházelo k dokonalému spalování a vyhoření hořlaviny. Ve spalinách by docházelo k hromadění oxidu uhelnatého, který je produktem nedokonalého spalování, a v extrémních případech by to vedlo k produkci kouře. Na druhou stranu přílišné množství přebytkového vzduchu zvyšuje nároky na zahřívání, čímž by docházelo k navýšení provozních nákladů.

Pro dosažení úplného zneškodnění polutantů je také předpokládáno, že je zachována požadovaná doba zadržet ve spalovací komoře a dochází k udržení potřebné velikosti turbulence. Pokud je v odplynu dosaženo vysoké koncentrace spalitelných látek, je možné uvažovat o samovolném průběhu spalování.

Konstrukčním uspořádáním výměníku zajišťuje protiproudý tok obou médií, která proudí obdélníkovými kanály v opačném směru. V praxi je více využíváno protiproudé zapojení médií z důvodu dosažení větší hodnoty ΔT_{ln} za daných hodnot koncových teplot obou proudů. Což současně znamená, že při stejném výkonu Q a součiniteli přestupu tepla k je obdržena menší plocha výměny tepla A , a tedy i menší nároky na rozměry zařízení, které vedou ke snížení investiční nároků. Vše vyplývá z následující rovnice tepelného výkonu (přenosová rovnice):

$$Q = A \cdot k \cdot \Delta T_{ln}, \quad (1)$$

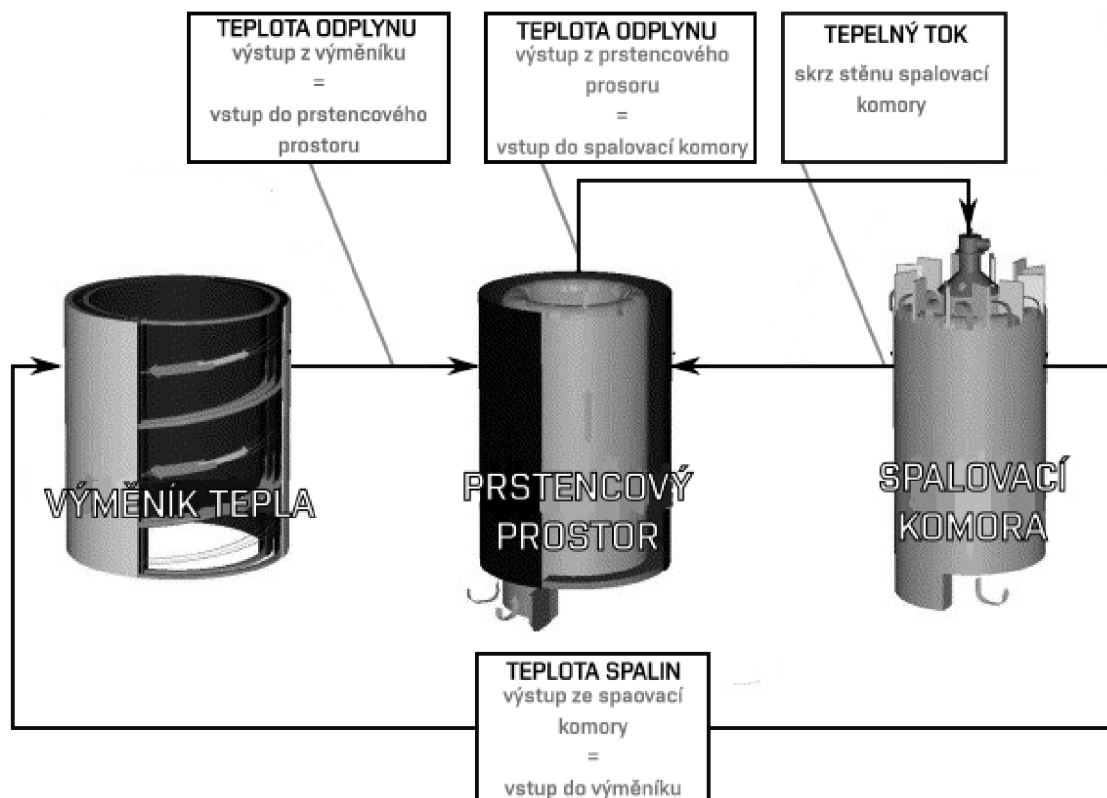
z čehož vyplývá $\uparrow \Delta T_{ln} \downarrow A$,

kde	Q	výkon výměny tepla	$[W]$
	A	plocha výměny tepla	$[m^2]$
	k	součinitel přestupu tepla	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
	T_{ln}	střední teplotní rozdíl	$[K]$

Matematický model zařízení je složen ze tří submodelů, kterými jsou:

- výměník tepla;
- spalovací komora;
- prstencový prostor mezi nimi.

Submodely jsou vhodně zvoleny tak, že výstupní parametry z jednoho jsou současně vstupní parametry následného submodelu. Struktura znázorněná na obrázku 7 označuje iterační postup výpočtu.



Obrázek 7: Struktura matematického modelu[6]

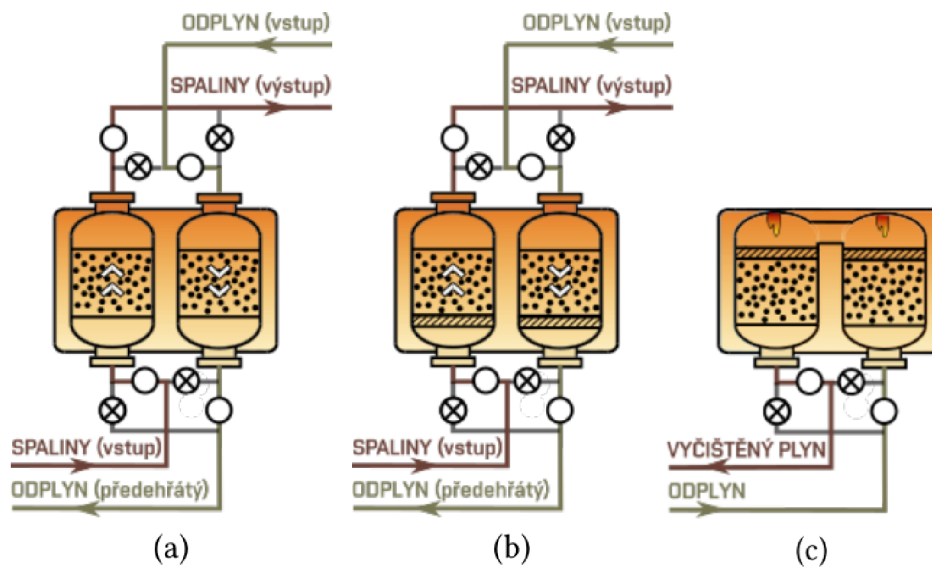
2.2 Integrované zařízení „regenerátor“

Regenerátory jsou zařízení využívaná pro tzv. nepřímou výměnu tepla mezi teplým a studeným médiem. Teplo je nejprve odevzdáno teplým médiem výplňovému materiálu lože výměníku a následně je naakumulované teplo předáváno studenému médiu. Teplé a studené médium jsou střídavě v kontaktu s pevným materiálem výplně a dochází k výměně tepla mezi oběma plynnými proudy [10].

Na obrázku 8 jsou znázorněna různá provedení regenerátorů, která se liší dle aplikace. Na ústavu procesního inženýrství je pozornost soustředěna na vývoj katalyzátorů a jejich nasazení do provozních zařízení, ať už se jedná o regenerátory nebo reaktory určené pro katalytickou oxidaci.

Správná konstrukce regenerátorů je poměrně obtížná. Základem jsou složité diferenciální rovnice, které je pro úspěšný návrh třeba vyřešit. Problém současně nastává při výběru vhodného způsobu výpočtu koeficientu přestupu tepla a tlakové ztráty. Jejich výběr je ovlivněn typem výplňového materiálu lože. Na trhu není dostupný žádný software pro navrhování regenerativních výměníků tepla. Na Ústavu procesního inženýrství byl proto vyvinut na míru šitý výpočetní postup pro regenerační výměníky tepla, aby došlo k jejich hojnějšímu rozšíření v průmyslové praxi.

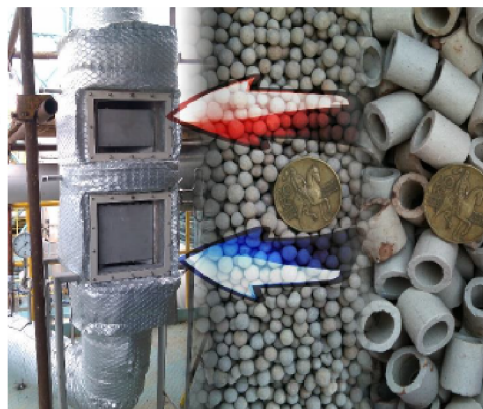
Impulsem k vytvoření bylo rozšíření povědomí o regenerativních výměnících tepla, s cílem poskytnout konstruktérům přehled o vhodných metodách výpočtu, a tím rozšířit zájem a využití regenerátorů. V současné době vzrůstá zájem o nové technologie určené pro čištění plynů z důvodů snižování emisí vypouštěných do ovzduší. Dodavatelé zařízení nebo technologií usilují o vývoj, zavádění a testování různých technologií čištění plynů,



Obrázek 8: (a) Regenerátor pro ohřívání/ochlazování proudících médií, (b) regenerátor pro čištění spalin a odpadních plynů - možnost 1, (c) regenerátor pro čištění spalin a odpadních plynů - možnost 2 [10]

kteří budou splňovat náročnější technické normy, standardy, resp. nové legislativní a technické předpisy [11].

Cílem vývojových prací bylo sestavení prototypového zařízení umožňujícího likvidaci těkavých organických látek s nízkou energetickou náročností [12]. V dizertační práci [11] bylo využito poznatků o katalytických náplních a byla navržena experimentální jednotka pro ověřování technologií čištění plynů, která je zachycena na obrázku 9. Jednotka je variabilní zejména z důvodu použitého modulárního konstrukčního řešení. Hlavní výhodou zařízení jsou široké možnosti nasazení v praxi do různých podmínek, a i těžkých chemických provozů. Předpokládá se široké uplatnění a nasazení v laboratorním i průmyslovém prostředí.

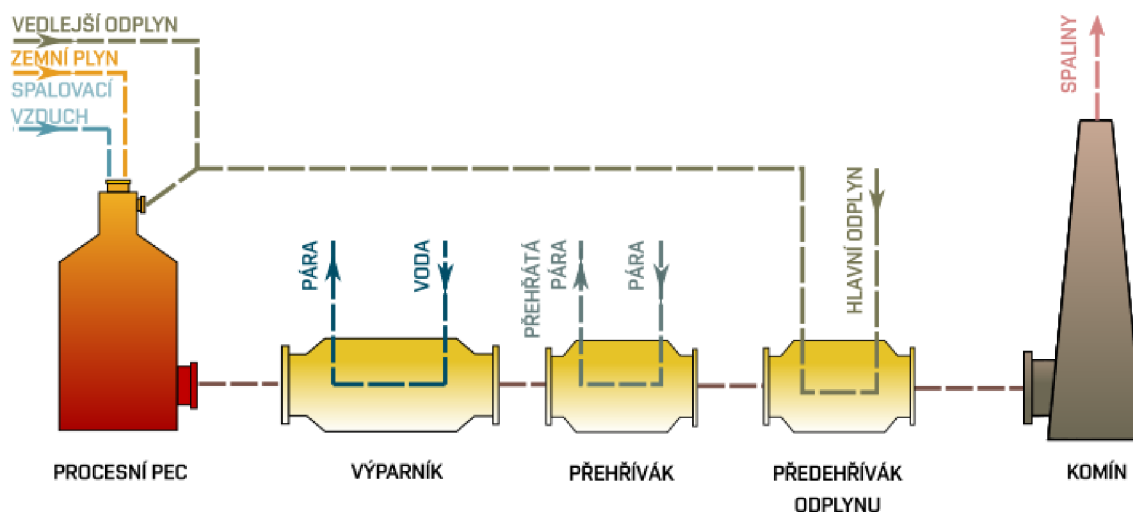


Obrázek 9: Poloprovozní jednotka s katalyzátorem vyvíjená na Ústavu procesního inženýrství [11]

3 Popis zkoumané průmyslové jednotky „waste-to-energy“

Potenciál možného nasazení různých provedení MIZ bude studován na konkrétním případu průmyslové jednotky „waste-to-energy“ pro termické zneškodňování plyného odpadu, která bude za tímto účelem nyní blíže představena. Oproti procesu pro termické zneškodňování vzdušiny (představené v kapitole 1 diplomové práce) se jednotky zneškodňující průmyslové odpadní plyny vyznačují tím, že množství tepelné energie ve spalinách odcházejících ze spalovací komory je podstatně větší než lze využít pro přehřev zneškodňovaného plyného odpadu. Z tohoto důvodu jsou nejprve za spalovací komoru zařazeny zařízení pro energetické využití odpadního tepla (odtud název „waste-to-energy“) a teprve pak je zařazen přehřev zneškodňovaného odpadního plyného proudu. Tak je tomu i ve zkoumané průmyslové jednotce, jež bude nyní představena. Cílem zkoumaného průmyslového procesu je zpracování odpadního plynu (dále odplyn) vznikajícího v jiné části provozu. Organické látky obsažené v odpadních proudech jsou likvidovány termickým spalováním v plameni zemního plynu. Pro vyhodnocení možností úprav a potenciálního nasazení integrovaných zařízení je nutné obeznámit se stávající konstrukcí a skladbou použitých zařízení určených k tomuto účelu. Na základě znalosti provozu může být dále rozhodnuto o vhodných návrhových koncepcích s ohledem na efektivitu, finanční náročnost a environmentální dopady.

Účelem jednotky, jejíž schéma je znázorněno na obrázku 10, je likvidace vzniklého odplynu obsahujícího velké množství látek škodlivých pro životní prostředí. Jmenovitě se typicky jedná o kyslík (O_2), dusík (N_2), vodu (H_2O), oxid uhelnatý (CO), oxid uhličitý (CO_2), kyselinu akrylovou ($C_3H_4O_2$), kyselinu octovou ($C_2H_4O_2$), propylen (C_3H_6), propan (C_3H_8), formaldehyd (CH_2O). Konkrétní koncentrační zastoupení látek se může v průběhu času lišit v závislosti na složení vstupní směsi.



Obrázek 10: Schéma části průmyslové jednotky „waste-to-energy“

K odstranění škodlivin z odplynu dochází oxidací spalitelných polutantů kyslíkem obsaženým ve vzduchu za vysokých teplot, kdy dochází k jejich zneškodňování za vzniku inertních plynů, kde například může být uveden CO_2 a H_2O . Během spalovacího procesu je uvolňováno teplo. Teplo obsažené ve spalinách opouštějících spalovací komoru je

využíváno například pro výrobu a přehřívání páry a předehřev odplynu, čímž dochází k redukci spotřeby paliva, které musí být spalováno ve spalovací komoře pro dosažení teploty potřebné k likvidaci nežádoucích složek.

Průmyslová jednotka pro termické zpracování plynného odpadu je složena ze spalovací komory, výparníku, přehříváku páry, předehříváku odplynu a komínu. Zařízení jsou za sebou řazeny ve zmíněném pořadí, jak schematicky znázorňuje obrázek 10.

Směs je spalována ve spalovací komoře, kde dochází za vysokých teplot ke zneškodnění nežádoucích látek, které nemohou být komínem vypouštěny do ovzduší. Proces spalování ke svému uskutečnění potřebuje dostatečné množství vzduchu. Pro dosažení teploty vznícení oxidu uhelnatého a těkavých organických sloučenin je současně spalován zemní plyn o výhřevnosti 53 MJ/kg [13]. Zemní plyn jako externí zdroj představuje zvýšení finančních nároků na provoz a je tak snaha o minimalizaci jeho spotřeby. Toho může být dosaženo předehřátím odplynu na teplotu blízko teplotě vznícení. Bližší popis jednotlivých zařízení představené průmyslové jednotky bude proveden v následujících kapitolách.

3.1 Spalovací pec

Termické zneškodňování odplynu probíhá jako exotermická reakce, pro kterou je typické uvolňování energie. Pro tento typ reakcí obecně platí, že s rostoucí teplotou se zvyšuje reakční rychlost, ale současně se zhoršuje rovnováha. Naopak při snižující se teplotou se zlepšuje rovnováha, ale snižuje se reakční rychlost. Pro dosažení maximálního efektu exotermických reakcí je nutné najít optimální pracovní teplotu.

Vhodné podmínky procesu spalování jsou blíže identifikovány v [14], kde jako hlavní faktory mající vliv na účinnost zneškodňování znečišťujících látek spalováním jsou stanoveny tzv. tři „T“:

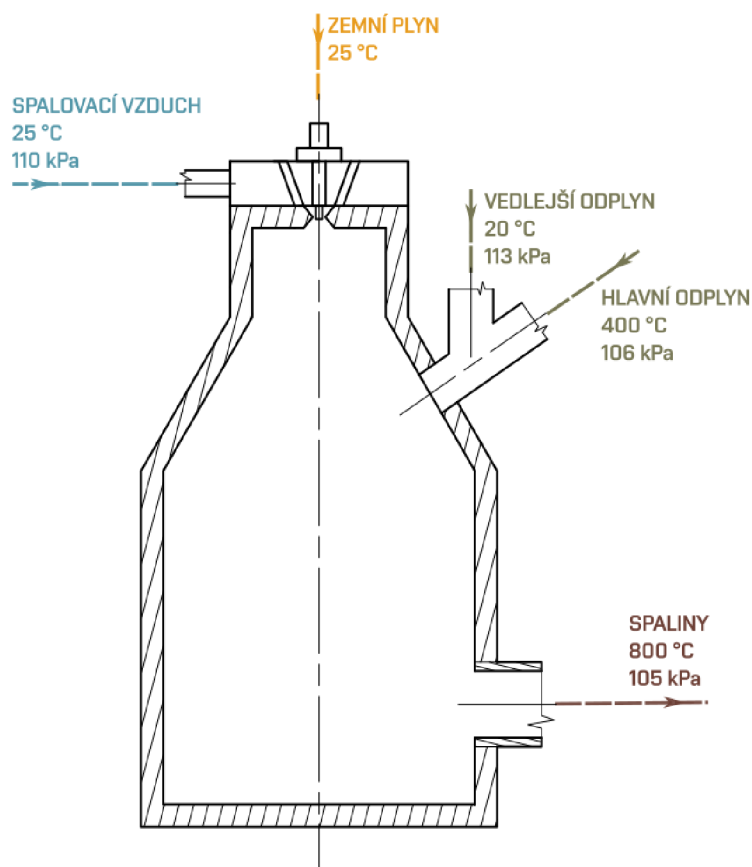
- teplota – záleží na složení zneškodňovaného odplynu;
- čas (z anglického time) – tj. zdržná doba, obvykle 0.2 – 2.0 s dle složení zneškodňovaného odplynu;
- turbulence – promíchání.

Teplota a zdržná doba jsou ovlivněny termodynamikou a kinetikou procesu spalování. Doba zdržení určuje velikost komory a požadovaná teplota udává množství pomocného paliva, které bude třeba pro průběh spalování přivést. Turbulence vede ke zlepšení efektivity a závisí na typu konstrukce spalovací komory, průtoku odplynu, paliva a vzduchu, současně záleží i na způsobu, jakým jsou do komory přiváděny.

Ve spalovací komoře dochází k zahřátí směsi na teplotu vznícení odplynu. V závislosti na konkrétním zastoupení znečišťujících látek se tato teplota pohybuje mezi 600 – 1100 °C [14]. Například při termickém zneškodňování tuhého komunálního odpadu je potřebné mít teplotu minimálně 850 °C a k odstranění nežádoucích složek je nutné setrvat na této teplotě alespoň po dobu 2 s, jak je uvedeno v [15].

Polutanty během tohoto procesu reagují s kyslíkem obsaženým ve spalovacím vzduchu a dochází k rozkladu na oxid uhličitý a vodu. Proces je označován také jako termická oxidace, která je uplatňována především v případech zneškodňování velkého množství plynu obsahujícího škodlivé organické složky a oxid uhelnatý (CO).

Ve studovaném průmyslovém procesu je odplyn přiváděn do horní (směšovací) části spalovací komory, kde je instalován hořák a dochází k samotnému procesu spalování.



Obrázek 11: Zjednodušený náčrt spalovací komory

Uskutečnění reakce se projevuje expanzí plynu ve spalovacím prostoru, což ovlivňuje nároky na rozměry spalovacího zařízení. Spalovací komora popisované průmyslové jednotky má průměr 3 m a výšku 10,95 m, její náčrt je zobrazen na obrázku 11. Z důvodu vysokých teplot během této operace je nutná vyzdívka a izolace komory, aby nedocházelo k velkým ztrátám tepla do okolí. Z důvodu bezpečnosti obsluhy se vnější teplota nechráněných povrchů musí pohybovat do 70 °C, jak je stanoveno [16], aby bylo zamezeno případnému popálení. Místa s povrchovou teplotou vyšší než 70 °C je nutno chránit proti doteku osob. V neposlední řadě je tak zabráněno i přehřátí ocelové konstrukce a následné ztrátě stability.

Spaliny opouštějí komoru při teplotě 800 °C. Teplo obsažené ve spalinách je používáno ke zvýšení tlaku a teploty cirkulační vody pomocí předaného tepla, které vzniká během procesu spalování v následně řazených zařízeních. Teplo absorbované vodou je posíláno na turbínu, kde dochází k transformaci energie. Vyrobená elektrická energie je dále přeprodávána zákazníkům a dochází tak ke snížení finanční náročnosti spojené se zpracováním surovin.

Spalovací komora je navržena na kapacitu 10,36 MW, která silně převyšuje aktuální spotřebu zařízení využívajících produkované teplo. Lze předpokládat předimenzování komory pro původně nejasněné potřeby daného procesu a bylo by v současnosti výhodnější uvažovat s kompaktnějším zařízením, které vhodně pokryje nyní známou kapacitu. Nalezení vhodnějšího konstrukčního řešení pro daný proces znamená nahrazení komorou s menším výkonem, u které by došlo k plnému využití jejího potenciálu. Pokud je

realizována předdimenzovaná spalovací komora, dochází ke znatelnému snížení účinnosti vlivem ztrát. Tepelná účinnost je snižována, když je komora pro zneškodňování plynného odpadu provozována s nízkou rychlostí proudění způsobující nedostatečné promíchání nebo dochází ke zkrácení cyklu, které je častým problémem u spalovacích zařízeních, kde se předpokládalo budoucí rozšíření provozu a větší vytížení zařízení, ke kterému nikdy nedošlo [17].

Vzhledem k předdimenzování převyšující potřeby provozu byl navržen pracovníky Ústavu procesního inženýrství nový aparát, který by postačoval pro produkci dostatečného množství tepla, které musí být dodáváno do navazujících zařízení, aby došlo k zachování výstupních parametrů stávajícího provozu. Průběh výpočtu nemůže být reprodukován vzhledem k tomu, že obsahuje charakteristická data o provozu, které jsou součástí technického know-how provozovatele. Z tohoto důvodu jsou uvedeny pouze hlavní rozměry nově navrhovaného zařízení. Stávající a nově navrhované rozměry spalovací komory jsou uvedeny v tabulce 1. Princip výpočtu spalovací komory je však ukázán na náhradním příkladu dále.

Tabulka 1: Charakteristické rozměry spalovací komory

Veličina	Charakteristický rozměr
Průměr nově navrhované spalovací komory	2 m
Průměr stávající spalovací komory	3 m
Délka nově navrhované spalovací komory	4 m
Délka stávající spalovací komory	10.95 m

3.1.1 Ukázka základního návrhu velikosti spalovací komory

Je uveden příklad návrhu rozměrů spalovací komory dle postupu z [14].

Jedná se o ukázkou návrhu spalovací komory pro zneškodňování odplynů z udírenské výroby. Ten má být do navrhované spalovací komory přiváděn o průtoku $\dot{V}_O = 2040 \text{ m}^3/\text{h}$ (15°C , $101\,325 \text{ Pa}$) při tlaku $101\,325 \text{ Pa}$ a teplotě $T_O = 80^\circ\text{C}$. Spalovací proces je provozován při $T_{SP} = 650^\circ\text{C}$ jako palivo bude použit zemní plyn. Známé parametry zbývajících přiváděných proudů jsou (viz obrázek 12):

- Spalovací vzduch vstupuje při 21°C , 20 % přebytek spalovacího vzduchu;
- zemní plyn vstupuje při 15°C .

Tepelné ztráty do okolí z povrchu spalovací komory se odhadují na 10%. Koncentrace znečišťujících látek ve vstupních a odcházejících plynech je malá, je tedy předpokládáno, že plyny mají vlastnosti vzduchu. Výhřevnost zemního plynu je stanovena jako $LHV_{ZP} = 36.513 \text{ MJ}/\text{m}^3$. Základem pro návrh rozměrů spalovací komory je provedení materiálové a energetické bilance.

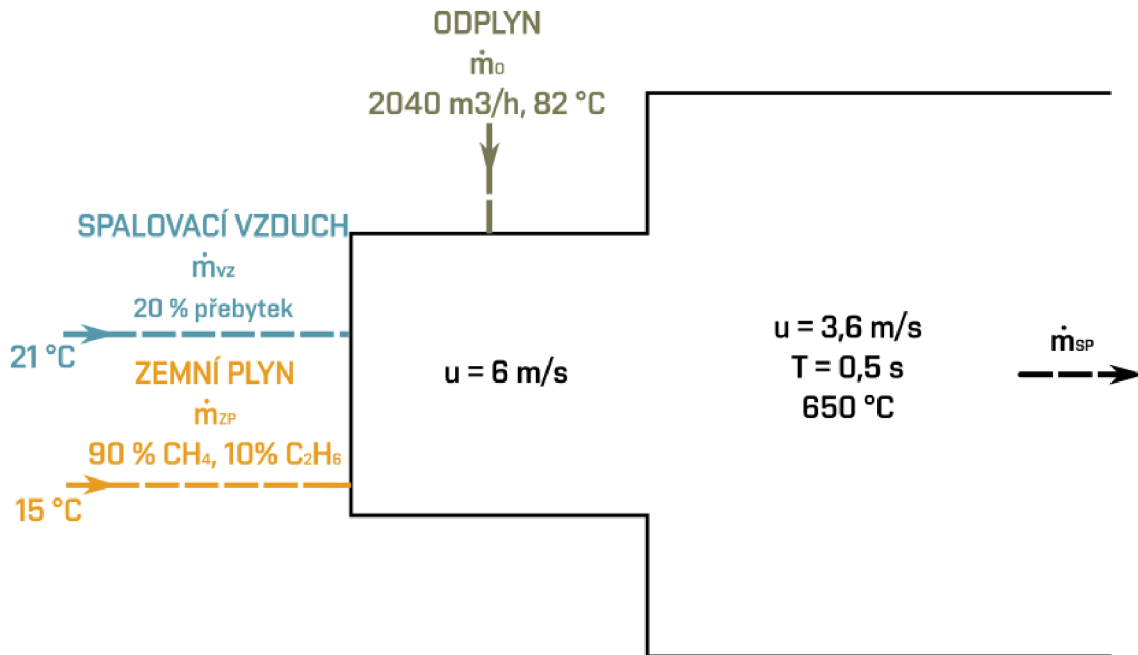
Materiálová bilance:

Sestavení rovnice pro výstupní proud spalin na jedné straně a součet proudů vstupujících do spalovacího zařízení na straně druhé:

$$\dot{m}_{SP} = \dot{m}_O + \dot{m}_{VZ} + \dot{m}_{ZP}, \quad (2)$$

kde

- m_{SP} hmotnostní průtok spalin [kg/s]
 m_O hmotnostní průtok odpadního plynu [kg/s]
 m_{VZ} hmotnostní průtok spalovacího vzduchu [kg/s]
 m_{ZP} hmotnostní průtok zemního plynu [kg/s]



Obrázek 12: Vzorový příklad

Energetická bilance:

Ztráty tepla do okolí lze v rovnici energetické bilance zohlednit buď jako fiktivní výstupní proud s pozitivní hodnotou, nebo jako fiktivní vstupní proud s následně negativní hodnotou. V souladu s [14] je použita druhá možnost:

$$m_{SP} \cdot h_{SP} = m_O \cdot h_O + m_{VZ} \cdot h_{VZ} + Q_{ZT} + m_{ZP} \cdot h_{ZP}, \quad (3)$$

- h_{SP} entalpie spalin [kJ/kg]
 h_O entalpie odpadního plynu [kJ/kg]
 h_{VZ} entalpie spalovacího vzduchu [kJ/kg]
 h_{ZP} entalpie zemního plynu [kJ/kg]
 Q_{ZT} ztráty tepla [kW]

Ze zadání vyplývá, že ztráty tepla do okolí Q_{ZT} tvoří 10 % z celkové uvolněné energie, tedy energie uvolněné – lze tedy Q_{ZT} uvažovat jako:

$$Q_{ZT} = -0.1 \cdot m_{ZP} \cdot \Delta h_{ZP}. \quad (4)$$

Každý z proudů vystupujících v procesu je přiváděn, resp. odváděn při jiné teplotě. Aby bylo možné s nimi počítat v rámci energetické bilance, je nutné vztáhnout všechny

entalpie k jediné referenční teplotě. Pro výpočet je volena teplota zemního plynu 15 °C, tedy je nutné provést přepočítání. Zároveň, jak bylo zmíněno výše, díky nízkým koncentracím znečišťujících látek je uvažováno s entalpií vzduchu v proudu odplynů i spalin. Po úpravě rovnice (3) je potom získán tvar:

$$m_{SP} \cdot (h_{650} - h_{15}) = m_O \cdot (h_{80} - h_{15}) + m_{VZ} \cdot (h_{21} - h_{15}) + Q + m_{ZP} \cdot \Delta h_{ZP}, \quad (5)$$

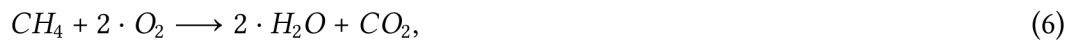
h_{650} entalpie vzduchu při 650 °C [kJ/kg]

h_{80} entalpie vzduchu při 80 °C [kJ/kg]

h_{21} entalpie vzduchu při 21 °C [kJ/kg]

h_{15} entalpie vzduchu při 15 °C [kJ/kg]

Stechiometrické rovnice pro spalování jednotlivých složek zemního plynu (v příkladu reprezentovaných zjednodušeně jen metanem a etanem) jsou:



Dále je nutné určit střední molární hmotnost zemního plynu $MW(ZP)$ složeného ze 2 složek pro další výpočty. Pro tyto účely je využita střední molární hmotnost metanu $MW(CH_4)$ a etanu $MW(C_2H_6)$:

$$MW(CH_4) = 16 \text{ g/mol},$$

$$MW(C_2H_6) = 30 \text{ g/mol}.$$

Ze známého procentuálního zastoupení jednotlivých složek je pak dopočtena hodnota směsi:

$$MW(ZP) = x_{CH_4} \cdot MW(CH_4) + x_{C_2H_6} \cdot MW(C_2H_6) = 0.9 \cdot 16 + 0.1 \cdot 30 = 17.4, \quad (8)$$

x_{CH_4} procentuální zastoupení metanu v zemním plynu [-],

$x_{C_2H_6}$ procentuální zastoupení etanu v zemním plynu [-].

Vzhledem k velkému počtu neznámých v materiálové bilanci je potřeba jejich eliminace, aby bylo možné případ řešit. Ze zadání je znám přebytek spalovacího vzduchu α a ze stechiometrické rovnice pak odpovídající počty molů kyslíku O_2 na jednotkové zastoupení počtu molů metanu a etanu obsažených v zemním plynu. Množství kyslíku ve vzduchu (reprezentovaného v tomto příkladu zjednodušeně jako směs kyslíku a dusíku) je uvažováno 21 %, zbylých 79 % zaujímá dusík. Je obdržena poměr počtu molů vzduchu n_{VZ} , které je nutné přivádět pro úplné spálení polutantů, k molovému zastoupení zemního plynu n_{ZP} :

$$\frac{n_{VZ}}{n_{ZP}} = 1.2 \cdot \left(0.9 \cdot \frac{2}{0.21} + 0.1 \cdot \frac{3.5}{0.21} \right) = 12.29 \text{ mol}_{vzduch}/\text{mol}_{ZP}. \quad (9)$$

Nyní se znalostí molárních hmotností, přičemž pro vzduch platí $MW(\text{vzduch}) = 28.85 \text{ g/mol}$, lze získat vztah mezi m_{VZ} a m_{SP} .

$$\frac{m_{VZ}}{m_{ZP}} = \frac{n_{VZ}}{n_{ZP}} \cdot \frac{MW(\text{vzduch})}{MW(ZP)} = 12.29 \cdot \frac{29}{17.4} = 20.32 \text{ kg}_{\text{vzduch}}/\text{kg}_{ZP}. \quad (10)$$

Průtok odplynu je zadán jako objemový \dot{V}_O v m^3/s , materiálová bilance je počítána v hmotnostních jednotkách. Pro rozměrovou konzistenci je nutné zavést přepočít, ve kterém vystupuje hustota odplynu (reprezentovaného vzduchem) ρ_{VZ} v kg/m^3 . Ta je stanovena pomocí programu Maple 2020 [18] pro referenční hodnotu 15°C (viz Příloha 1 diplomové práce) a obsahuje hodnoty $\rho_{VZ} = 1.22 \text{ kg}/\text{m}^3$. Hmotnostní průtok odplynu pak bude:

$$\dot{m}_O = \dot{V}_O \cdot \rho_{VZ} = \frac{2040}{3600} \cdot 1.22 = 0.69 \text{ kg/s}. \quad (11)$$

Dosazením rovnic (11) a (10) do (2) je získáno:

$$\dot{m}_{SP} = 0.69 + \dot{m}_{VZ} + \frac{\dot{m}_{VZ}}{20.32}. \quad (12)$$

Pro výpočet rovnice o dvou neznámých je potřeba dodat další rovnici, kterou je energetická bilance procesu spalování. Pro potřeby výpočtu jsou známy hodnoty všech entalpií, s výjimkou paliva, kde je pro rozměrovou konzistentnost nutný převod zadané výhřevnosti pro získání odpovídajících jednotek, k čemuž je využita stavová rovnice:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T, \quad (13)$$

kde p je tlak, V objem plynu, n počet molů, R univerzální plynová konstanta, která nabývá hodnoty $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$.

$$n = \frac{m}{MW(ZP)}. \quad (14)$$

Dosazením (14) do (13) získáváme vztah pro výpočet hustoty zemního plynu ρ_{ZP} :

$$\rho_{ZP} = \frac{\dot{m}_{ZP}}{\dot{V}_{ZP}} = MW(ZP) \cdot \frac{p}{R \cdot T_{ZP}} = 17.4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{101325}{8.3143 \cdot (273.15 + 15)} = 0.74 \text{ kg}/\text{m}^3. \quad (15)$$

Entalpie zemního plynu v kJ/kg se pak získá:

$$\Delta h_{ZP} = LHV_{ZP} \frac{1}{\rho_{ZP}} = 36.513 \cdot \frac{1}{0.735} = 49.37 \text{ MJ}/\text{kg}. \quad (16)$$

Entalpie potřebné pro vyčíslení energetické bilance pro dané teploty určeny pomocí programu Maple 2020 [18] (blíže viz Příloha 1 diplomové práce):

$$h_{15} = 291.08 \text{ kJ}/\text{kg},$$

$$h_{21} = 297.17 \text{ kJ}/\text{kg},$$

$$h_{82} = 357.17 \text{ kJ}/\text{kg},$$

$$h_{650} = 967.93 \text{ kJ}/\text{kg}.$$

Dosazením rovnic (4), (12), (10) do (2) eliminujeme počet neznámých na jednu a rovnici je nyní možné řešit pro \dot{m}_{VZ} :

$$\left(0.69 + \dot{m}_{VZ} + \frac{\dot{m}_{VZ}}{20.32}\right) \cdot (967.93 - 291.08) =$$
$$0.69 \cdot (357.17 - 291.08) + \dot{m}_{VZ} \cdot (297.17 - 291.08) + 0.90 \cdot \frac{\dot{m}_{VZ}}{20.32} \cdot 49.37 \cdot 10^3.$$
(17)

Vyčísleno:

$$\dot{m}_{VZ} = 0.28 \text{ kg/s.}$$

Pro získání plochy průtočného průřezu spalovací komory je nejprve nutné kvantifikovat objemový průtok spalin \dot{V}_{SP} . Dopočtení \dot{m}_{ZP} z (10):

$$\dot{m}_{ZP} = \frac{0.28}{20.32} = 0.014 \text{ kg/s.}$$

Nyní je možné přejít k vyčíslení \dot{m}_{SP} z rovnice (2):

$$\dot{m}_{SP} = 0.69 + 0.28 + 0.01 = 0.99 \text{ kg/s.}$$

Objemový průtok spalin (při hustotě pro 650 °C $\rho_{VZ650} = 0.38 \text{ kg/m}^3$):

$$\dot{V}_{SP} = \frac{\dot{m}_{SP}}{\rho_{VZ650}} = 2.6 \text{ m}^3/\text{s.}$$
(18)

Průtočný průřez spalovací komory z rovnice pro objemový průtok spalin:

$$\dot{V}_{SP} = A_{PP} \cdot u,$$
(19)

kde A_{PP} je průtočný průřez komory v m^2 . Pro rychlost v hrdle komory (viz obrázek 12) platí $u_1 = 6 \text{ m/s}$, pro průtočný průřez hrdla A_{PP1} potom platí:

$$A_{PP1} = \frac{\dot{V}_{SP}}{u_1} = \frac{2.6}{6} = 0.43 \text{ m}^2$$
(20)

Průměr hrdla D_1 je pak:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{PP1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.43}{\pi}} = 0.74 \text{ m}$$
(21)

Pro rychlost $u_2 = 3.6 \text{ m/s}$ ve spalovací komoře (viz obrázek 12) je průtočný průřez komory:

$$A_{PP2} = \frac{\dot{V}_{SP}}{u_2} = \frac{2.6}{3.6} = 0.72 \text{ m}^2$$
(22)

Průměr spalovací komory D_2 je potom:

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{PP2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.72}{\pi}} = 0.96 \text{ m}$$
(23)

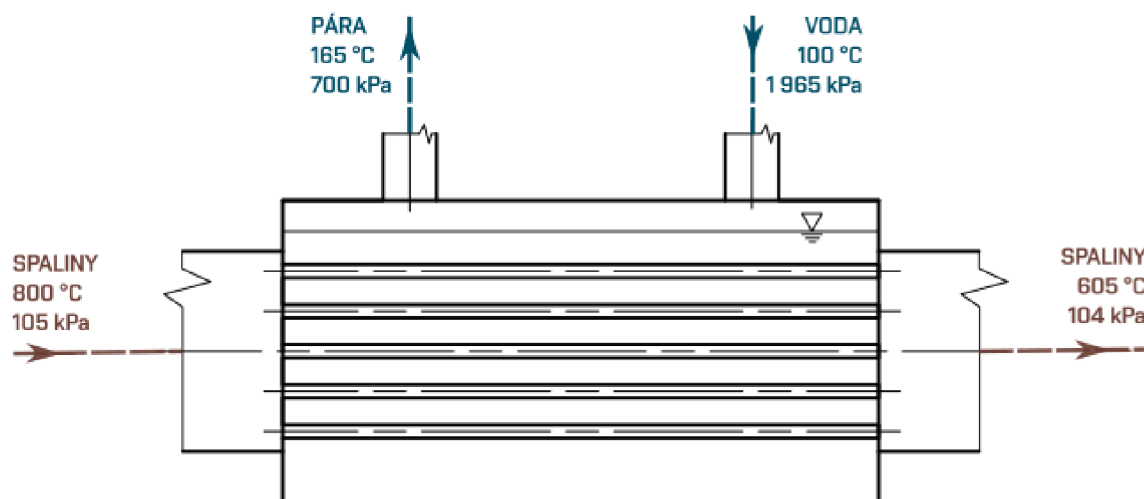
Délka spalovací komory l je následně vypočtena na základě zadané zdržné doby $\tau = 0.5 \text{ s}$:

$$l = \tau \cdot u_2 = 0.5 \cdot 3.6 = 1.8 \text{ m}$$
(24)

3.2 Výparník

Jedná se o jednoduchý žárotrubný kotel na odpadní teplo, do jehož mezitrubkového prostoru proudí napájecí voda, která odebírá teplo proudu spalin přicházejících do trubek výparníku ze spalovací komory. Tím, že jsou spaliny vedeny do trubkového prostoru, zatímco voda se nachází v mezitrubkovém prostoru, jsou eliminovány ztráty tepla do okolí i nároky na teplotní odolnost materiálu pláště.

Spaliny jsou využívány k produkci nízkotlaké syté páry, která je odváděna z výparníku a přidávána k nízkotlaké páře vyráběné podnikovou teplárnou. Z tohoto důvodu nejsou její parametry klíčové pro provoz spalovny. Zjednodušené schéma výparníku, kterým je trubkový výměník s pevnými trubkovnicemi a hladkými trubkami a 1 chodem v trubkovém i mezitrubkovém prostoru, se nachází na obrázku 13, kde hlavní rozměry jsou 3,8 x 2,8 x 2 m (délka x výška x průměr). Celkový počet trubek ve výměníku je 46 o délce 3,5 m, uspořádání trubek vůči sobě je voleno do trojúhelníku.



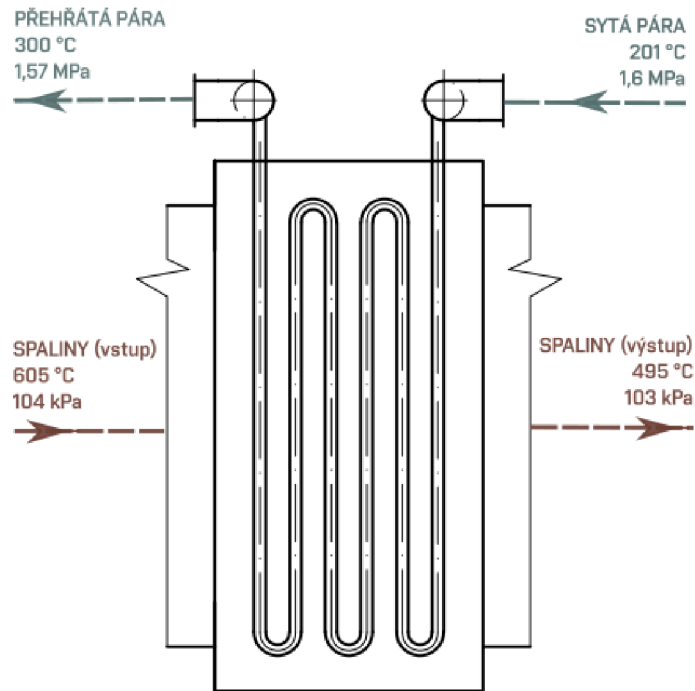
Obrázek 13: Zjednodušené schéma výparníku

3.3 Přehřívák páry

Jedná se o výměník tepla se svazkem trubek a křížovým tokem spalin, jak zachycuje obrázek 14. Charakteristickým rysem přehříváků je komplikované uspořádání proudění a vysoká teplota vodní páry a spalin. Použitý svazek trubek účinně kompenzuje teplotní dilatace a zajišťuje dostatečnou flexibilitu, čímž je zabráněno deformaci trubek za provozu.

Přehřívák lze vypočítat jako typický tepelný výměník pomocí konvenčních metod, jako je metoda ϵ -NTU (účinnost – počet přenosových jednotek) nebo metoda založená na logaritmickém středním teplotním rozdílu mezi oběma médii (metoda LMTD) [19],[20] při zohlednění radiační složky přenosu tepla ze spalin.

V přehříváku dochází k přehřátí středotlaké syté páry na přehřátou páru. V případě výroby přehřáté páry o parametrech vyšších než jsou přípustné hodnoty pro vstup na turbínu je do proudu vstříkována voda, tím dochází k zvětšení objemu par, a tím i zvýšení výnosů při současném zabránění poškození turbíny. Přehřátá pára slouží pro výrobu elektrické energie, tedy je nejdůležitějším produktem procesu, který rozhoduje o ziscích. Vzhledem ke klíčivosti tohoto zařízení je třeba brát do úvahy zachování parametrů



Obrázek 14: Schéma přehříváku páry

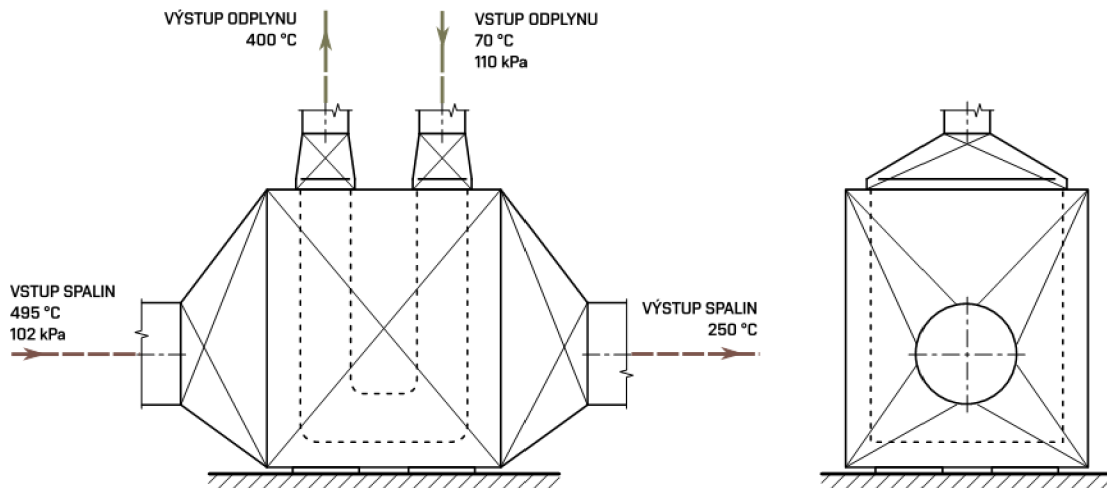
vystupující páry během uvažovaných modifikací procesu za integrovaná zařízení, která jsou předmětem této diplomové práce.

Častým problémem u přehříváku páry je vysoká teplota spalin v kombinaci vzájemného styku s tlakovou parou. Při špatném konstrukčním návrhu hrozí nadměrné zahřívání trubek výměníku při současném snižování hmotnostního průtoku páry protékající trubkami. Následkem takového chování je lokální vysušení stěny spalinami o vyšší teplotě, což může přispět k přehřátí materiálu trubky a její nevratné deformaci [21]. Stejného výsledku může být dosaženo tvorbou usazenin vodního kamene na vnitřním povrchu trubky, což způsobuje velké zvýšení teploty stěny navzdory snížení tepelného toku přenašeného ze spalin do páry, tedy zmenšení účinnosti celé tepelné výměny v zařízení [21].

3.4 Předehřívák odplynu

Předehřívák využívá zbylou dostupnou energii spalin pro zahřátí odplynu, čímž dokončuje efektivní využití odpadního tepla produkovaných spalin. Jedná se o vhodný způsob maximálního využití dostupné energie obsažené v procesu při současném zachování požadované minimální komínové teploty. Odplyn může být zahřát maximálně na teplotu pod jeho bodem vznícení, čímž je zajištěna největší možná eliminaci spotřeby paliva (tj. zemního plynu) potřebného k průběhu. Obvykle je proto předehřívák řazen jako poslední plocha výměny tepla.

V popisované průmyslové jednotce dochází v předehříváku odplynu k předání tepla mezi spalinami odcházejícími z procesu směrem do komína a odplynem přiváděným k předehřátí pro účely snížení spotřeby zemního plynu. Spaliny vstupují do předehříváku o teplotě 495 °C a jsou v něm ochlazeny na teplotu 250 °C. Odplyn se přitom v předehříváku ohřeje ze 70 °C na 400 °C, jak je znázorněno na obrázku 15. Takto připravený odplyn



Obrázek 15: Zjednodušený náčrt přehříváku

je následně veden do spalovací komory, kde dochází k jeho promíchání s vedlejším odplynem a zneškodnění v plameni vytvořeném spalováním zemního plynu se spalovacím vzduchem. Přehřev je v průmyslové jednotce řazen jako poslední plocha výměny tepla.

Pohled na provozované zařízení pro přehřev odplynu je znázorněn na obrázku 16. Jedná se o trubkový výměník s hladkými trubkami ve tvaru širokého U (viz obrázek 15), který tak je na straně odplynu, ve 2-chodém provedení s křížovým tokem spalin. Velikost výměníku je 5 x 4,5 x 2,8 m (délka x výška x šířka). Plocha zastavěná tímto zařízením je relativně velká, což je spojeno s prostorovými, a tedy i finančními nároky na výstavbu.



Obrázek 16: Přehřev odplynu ve zkoumané jednotce

Přehřev je obecně vhodný způsob, jak uspořit množství použitého paliva při sou-

časném dosažení požadovaných provozních parametrů a tím zlepšení celkové efektivity provozu. Předehřev se ve zkoumané jednotce týká odplynu, avšak velmi často bývá využit i pro zvýšení teploty přiváděného spalovacího vzduchu. Potenciálními úsporami paliva v případě předehřátí spalovacího vzduchu v závislosti na teplotě, při které spalovací proces probíhá se zabývá [22]. Dosažené závěry zkoumání a vliv teploty předehřátí spalovacího vzduchu na procentuální úspory paliva jsou zachyceny v tabulce 2.

Tabulka 2: Vliv předehřátí spalovacího vzduchu na úspory paliva pro danou teplotu [22]

Teplota spalin na výstupu ze spalovací komory [°C]	Předehřátá teplota vzduchu [°C] / Procento úspory paliva[%]*					
	316	427	538	649	760	871
538	13	18	–	–	–	–
649	14	19	23	–	–	–
760	15	20	24	28	–	–
871	17	22	26	30	34	–
982	18	24	28	33	37	40

*Palivo: Zemní plyn při 10% přebytku vzduchu

3.5 Tepelný výkon jednotlivých zařízení

Pro potřeby koncepčních rozvah procesu je nutné znát tepelné výkony jednotlivých aktuálně provozovaných zařízení, aby bylo možné uvážit technologické možnosti a implementaci integrovaných zařízení do stávajícího provozu bez ovlivnění parametrů klíčových produktů procesu. Přehled tepelných výkonů podle jednotky je v tabulce 3. S hodnotami bude dále uvažováno při výběru vhodné potenciální modifikace procesu.

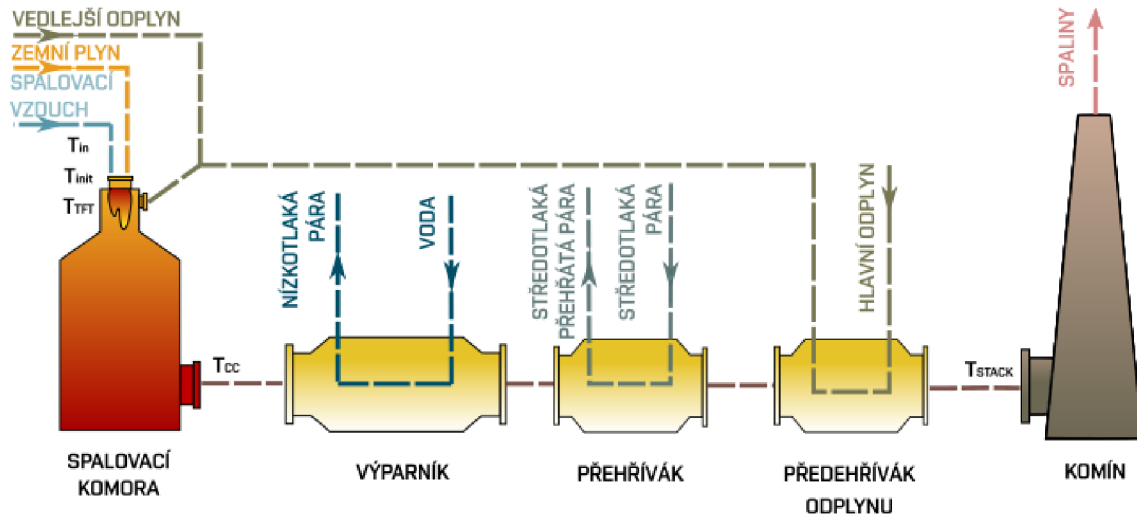
Tabulka 3: Tepelné výkony

Jednotka	Tepelný výkon [MW]	
	Projektovaný	Provozovaný
Spalovací pec	10.36	
Výparník		1.65
Přehřívák páry		0.89
Předehřívák odplynu		1.89

Spalovací komora využívaná v provozu je naprojektována na výkon 10.36 MW. Provozovaný výkon výparníku, přehříváku páry a předehříváku odplynu dohromady činí 4.43 MW. Spalovací komora je tedy předimenzována pro potřeby stávajícího provozu.

Průběh procesu generování a využívání tepla je následující: Ve spalovací komoře jsou společně zneškodňovány dva proudy odpadních plynů (hlavní a vedlejší). Pro hoření plamene hořáku je jako palivo používán zemní plyn pro zajištění průběhu termické oxidace polutantů, spaliny jako produkt spalovací reakce opouští komoru při vysoké teplotě 800 °C. Vzniklé odpadní teplo obsažené ve spalinách je nejprve využíváno ve výparníku pro výrobu nízkotlaké syté páry, která je využívána v provozu jako ohřevné médium. V přehříváku je vyráběna přehřátá středotlaká pára, která je přiváděna na

turbínu za účelem výroby elektrické energie. Předehříváku odplynu zahřívá hlavní proud odpadního plynu před jeho vstupem do spalovací komory, což snižuje požadavky na externí energetické zdroje. Celý proces i s označením teplot zobrazuje obrázek 17.



Obrázek 17: Studovaná jednotka zneškodňování odpadního plynu se zaznačenými význačnými teplotami

Zařízení na využití tepla vzniklého zneškodňováním odpadního plynu jsou výparník, přehřívák a předehřev hlavního odpadního plynu, jak je ukázáno na obrázku 17. Provozovatelem byly poskytnuty klíčové údaje o procesu, jako jsou teploty na vstupech a výstupech do zařízení, výkony a hmotnostní průtoky. Číselné hodnoty jednotlivých parametrů jsou přehledně shrnuty v tabulkách 4 a 5. Dle následující bilanční rovnice (25) byla na základě měřených provozních dat dopočtena střední měrná tepelná kapacita \bar{c}_p jednotlivých proudů. Charakteristiky pro zemní plyn a spalovací vzduch jsou v tabulce 6.

$$Q = \dot{m} \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T \quad (25)$$

Tabulka 4: Provozní parametry a geometrické charakteristiky

Jednotka	Typ	Horká strana		Chladná strana		Tepelný výkon [kW]
		Umístění média	T_{in-out} [°C]	Umístění média	T_{in-out} [°C]	
Výparník	Hladké trubky jednochodý	spaliny trubky	800-605	nízkotlaká pára plášť	100-165	1650
Přehřívák páry	Hladké trubky vícechodý	spaliny plášť	605-495	středotlaká pára trubky	201-300	890
Předehřívák odplynu	Hladké trubky dvouchodý	spaliny plášť	495-250	hlavní odpadní plyn trubky	70-400	1 890

Tabulka 5: Základní charakteristiky procesních proudů

Proud	Spaliny	Hlavní odpadní plyn	Nízkotlaká pára	Středotlaká pára
Hmotnostní průtok [kg/h]	19 403	16 594.2	2 524	13 000
Střední měrná tepelná kapacita [kJ/kg·K]	1.494	1.135	-	2.489

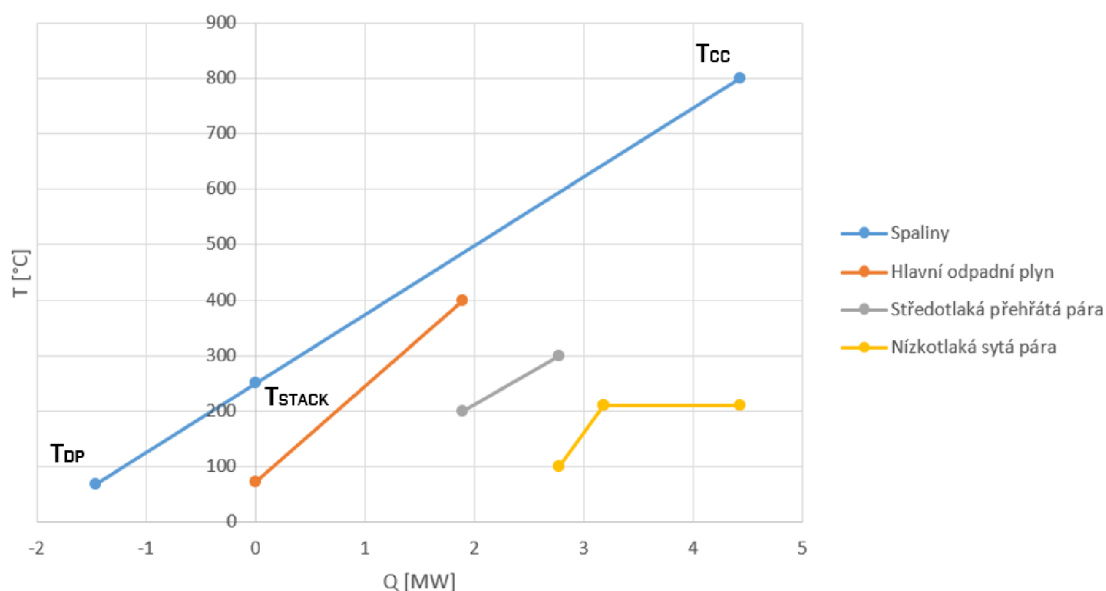
Tabulka 6: Parametry zemního plynu a spalovacího vzduchu, charakteristické teploty

Proud	Objemový průtok [m^3/h]	Výhřevnost	Střední měrná tepelná kapacita [$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$]	T_{in} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{TFT} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{STACK} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{DP} [$^{\circ}\text{C}$]
Zemní plyn	263	53 [13]	2.206	25	1 805 [13]	250	68.5
Sp.vzduch	3 011	-	1.012				

T_{in} - teplota na vstupu do spalovací komory

T_{TFT} - adiabatická teplota spalování

S využitím údajů z předchozích tabulek byl vytvořen T-Q diagram, který je zobrazen na obrázku 18, kde T_{CC} 800 $^{\circ}\text{C}$ představuje teplotu na výstupu ze spalovací komory a T_{STACK} komínovou teplotu. Extrapolací přímky spalin až na teplotu rosného bodu T_{DP} 68.5 $^{\circ}\text{C}$, která je vzhledem ke složení spalin stanovena jako teplota kondenzace vodních par.



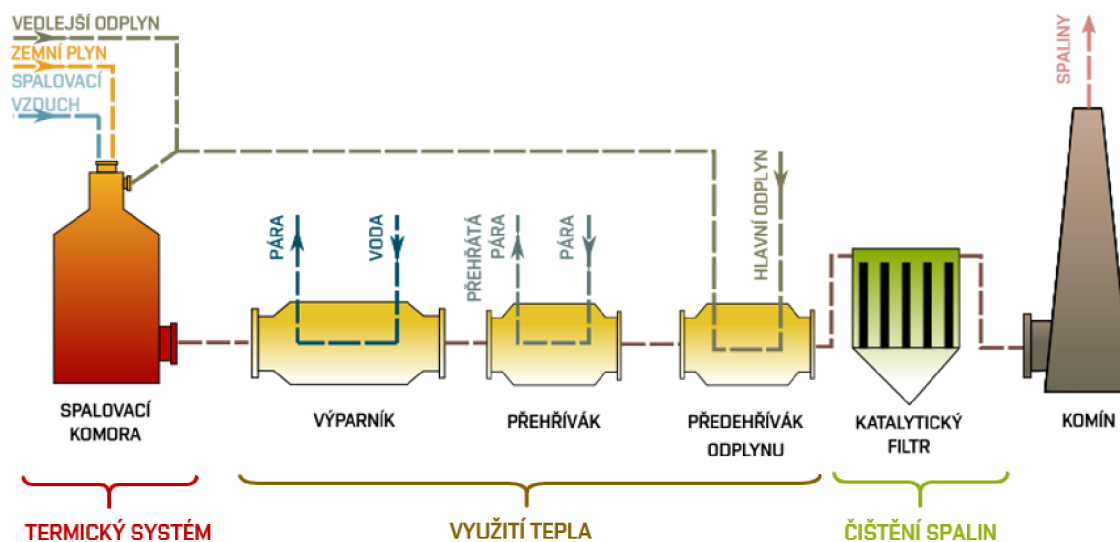
Obrázek 18: T-Q diagram

Současný proces je velmi energetický náročný, a proto je nutné se zaměřit na rekonstrukci a optimalizaci hmotnostních průtoků jednotlivých plynných proudů za účelem snížení spotřeby zemního plynu. [13] upravuje parametry provozu s cílem zajistit co nejlepší návrh pro využití odpadního tepla.

4 Potenciální koncepce MIZ pro řešený proces

Jednotky pro termické zpracování průmyslového plynného odpadu se v současnosti skládají z velkého množství nemalých zařízení, což si klade velké nároky na potřebnou plochu pro výstavbu a množství materiálu potřebného ke konstrukci. Úkolem diplomové práce je využít poznatky o současných moderních integrovaných zařízeních (MIZ), zvážit různé varianty uspořádání procesu spolu s možnostmi implementace MIZ a stanovit možné přínosy takto modifikovaného provozu.

Typicky jsou současné procesy „waste-to-energy“ složeny ze tří hlavních částí: termického systému, využití tepla a čištění spalin. To může být například reprezentováno katalytickým filtrem jako na obrázku 19. Vzhledem k plnění legislativních předpisů by každá jednotka zneškodňující odpad měla obsahovat systém čištění spalin, vyjma případů popsaných v kapitole 1, kdy se dosahuje úplné likvidace nežádoucích složek termickým zpracováním, a tedy není nutné použít zařízení na čištění spalin. Z tohoto důvodu bude nadále uvažováno čištění odcházejících spalin jako nutná součást procesu.



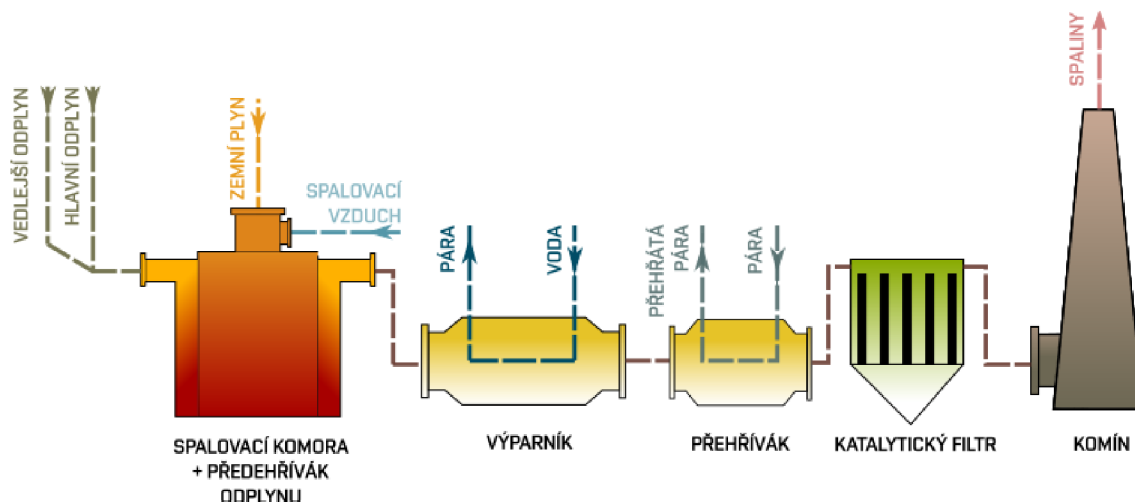
Obrázek 19: Kompletní schéma jednotky termického zpracování plynných odpadů

V návaznosti na základní úplné provedení průmyslové jednotky dle obrázku 19 jsou uvažovány tyto potenciální modifikace procesu a implementace MIZ:

- Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „koaxiál“
- Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „kotel na odpadní teplo“
- Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „žárotrubný kotel“
- Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „regenerátor“
- Potenciál MIZ typu „Spalovací ohříváč“

4.1 Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „koaxiál“

První uvažovanou možností je modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „koaxiál“, popsáným v kapitole 2.1. Toto MIZ spojuje do jedné kompaktní jednotky dvě hlavní zařízení, spalovací komoru a výměník pro předehřev zpracovávaného odplynu, jak ukazuje schéma 20.



Obrázek 20: Schéma modifikovaného procesu s MIZ typu „koaxiál“

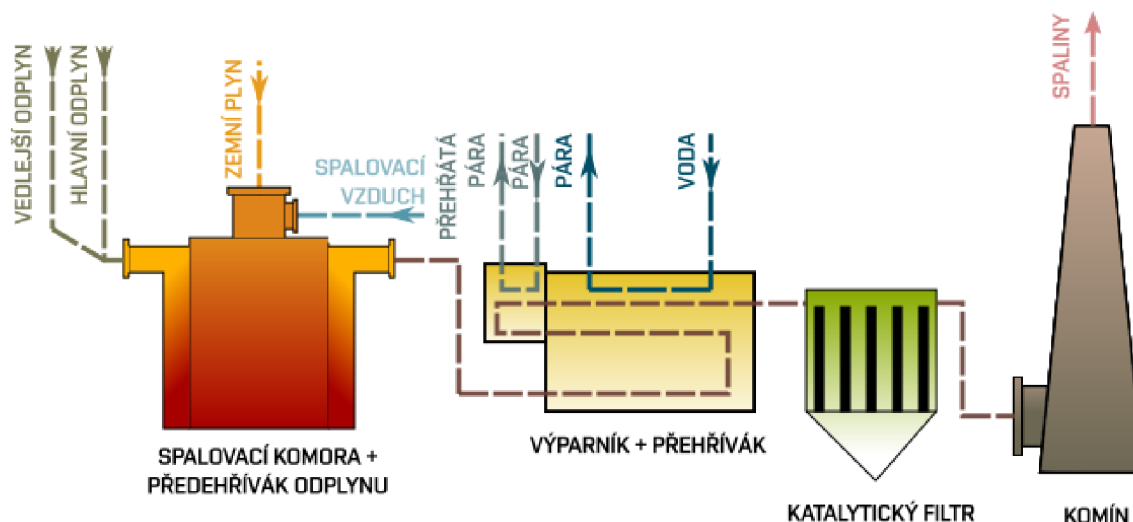
Hlavní výhodou nasazení MIZ typu „koaxiál“ je kompaktnost provedení, které vede k úspoře zastavěné plochy a materiálu, a tím k redukci investičních nákladů [7]. Dále jsou sníženy ztráty tepla do okolí, čímž dochází ke snížení spotřeby zemního plynu, což má za následek minimalizaci provozních nákladů [7]. Rizika, která je nutná zvážit před implementací MIZ typu „koaxiál“, jsou spojena s maximální dosažitelnou výstupní teplotou spalin ze spalovací komory cca 750 °C, jinak nastávají potíže s výměníkem. Pro vyšší teploty je nutná úprava „koaxiálu“ a zařazení radičních trubek pod spalovací komoru, které odeberou teplo procházejícím spalinám.

4.2 Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „kotel na odpadní teplo“

Další navrhovanou úpravou procesu je nahrazení výparníku a přehříváku. Náhradním zařízením zastupujícím funkci obou zmíněných zařízení je kotel na odpadní teplo s integrovaným přehřívákem páry. Kotel lze obecně charakterizovat jako uzavřenou, tlakovou nádobu, ve které je voda ohřívána, tak aby mohla být využívána k topným účelům v kapalném nebo plynném stavu. Ve zkoumaném případě je nutné mít na paměti zachování parametrů vystupující přehřáté páry, která je přiváděna na turbínu pro účely výroby energie. Připojení kotle na odpadní teplo je uvažováno hned za výstup z MIZ typu „koaxiál“, jak je znázorněno na schématu 21.

Kotle užívané v průmyslové praxi jsou obvykle dvojího typu, žárotrubné a vodotrubné. Základní charakteristika obou typů je uvedena v následujících dvou odstavcích dle [23].

Žárotrubné kotle jsou vhodné pro malé tepelné výkony a zpracování spalin s vysokou teplotou, které proudí uvnitř trubek a předávají svoji energii vodě, která je vně těchto



Obrázek 21: Schéma modifikovaného procesu s kotlem na odpadní teplo

trubek. Výhodou je jejich blokové uspořádání, rychlá montáž a relativně snadné čištění. Jako nevýhodu je nutné zmínit malý parní výkon vzhledem k velké zastavěné ploše, díky tomuto se přijatelná návratnost pohybuje cca do 2 MPa tlaku pracovního média. Žárotrubné kotle jsou konstruovány jako skořepiny o velkém průměru, což znamená omezený pracovní přetlak daný kotlovým vzorcem.

Druhým typem jsou kotle vodotrubné, které jsou nejčastěji používané kotle v běžné průmyslové praxi pro střední a vysoké tepelné výkony. Jejich výhodou je možnost použití i pro vysoké tlaky pracovního média (vody). Na rozdíl od žárotrubných kotlů disponují velkými parními výkony (také vzhledem k zastavěné ploše). Mezi jejich největší nevýhody patří dlouhá doba výstavby, staví se přímo na místě.

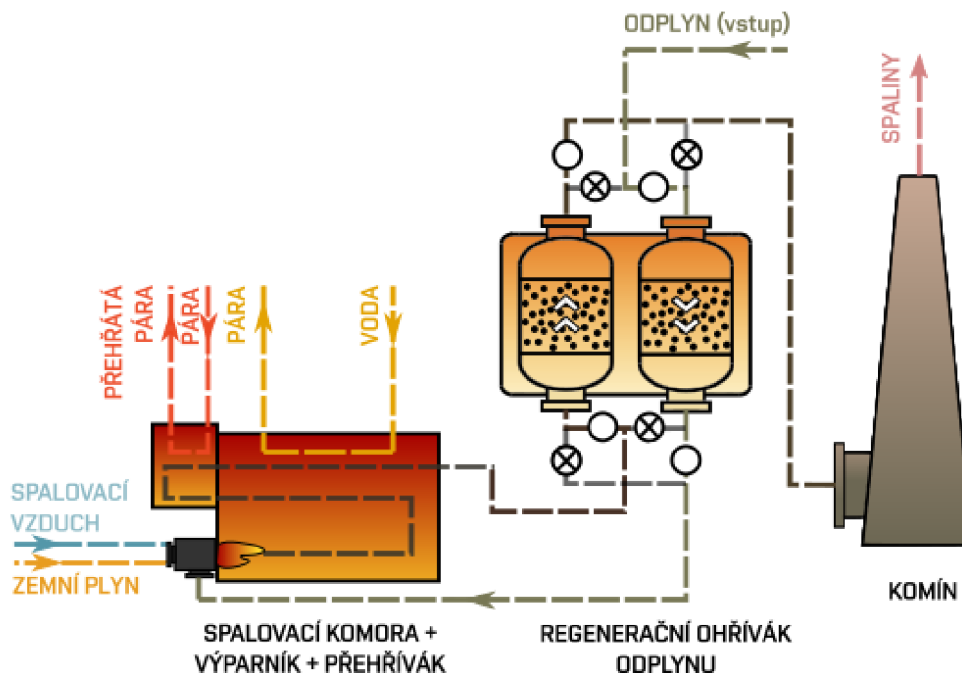
S přihlédnutím k vypočteným tepelným výkonům jednotlivých zařízení zařazených v procesu vychází požadovaná hodnota pro výkon spalovacího zařízení podstatně nižší než současná kapacita uváděná provozovatelem. Pro zvýšení efektivity a optimalizaci provozu je vhodnější vybrat žárotrubný kotel. Žádné z provozních médií zároveň nedosahuje tlaku vyššího než 2 MPa, takže lze počítat s přijatelnou návratností.

4.3 Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „žárotrubný kotel“

Při doplnění kotle na odpadní teplo z předešlé kapitoly o hořák, který bude přiváděn odplyn rovnou spalovat, vzniká nové MIZ zahrnující v sobě jak termický systém, tak i systém využití tepla. Schéma provozu se zařazeným žárotrubným kotlem je na obrázku 22.

Nově se zde objevuje i regenerační výměník pro predehřev odplynu a jako jednotka čištění spalin, aparát je blíže popsán v následující kapitole 4.4.

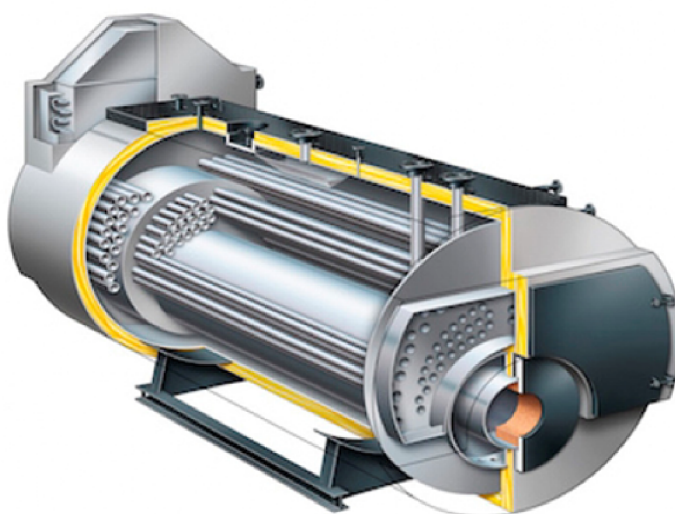
Hořák je umístěn ve spalovací komoře, označované jako plamencová komora, která je uzpůsobena tak, aby odolávala teplotnímu zatížení a kompenzovala teplotní dilatace materiálu mezi prvním a následnými chody, které jsou pevně uloženy v trubkovnici. Obvyklý počet chodů jsou tři, výjimečně se objevuje i čtyřchodové řešení žárotrubného kotle, které dosahuje vyšší účinnosti. K žárotrubnému kotli je navíc přiřazen i přehřívák



Obrázek 22: Schéma modifikovaného procesu s MIZ typu „žárotrubný kotel“ a MIZ typu „regenerátor“

páry, který využívá teplo spalin v obrátové komoře a spolu tak vytváří MIZ. Zmíněné konstrukční řešení je vhodné z důvodu zvyšování celkové účinnosti při snižování zastavěné plochy a množství použitého materiálu, tedy investičních nákladů.

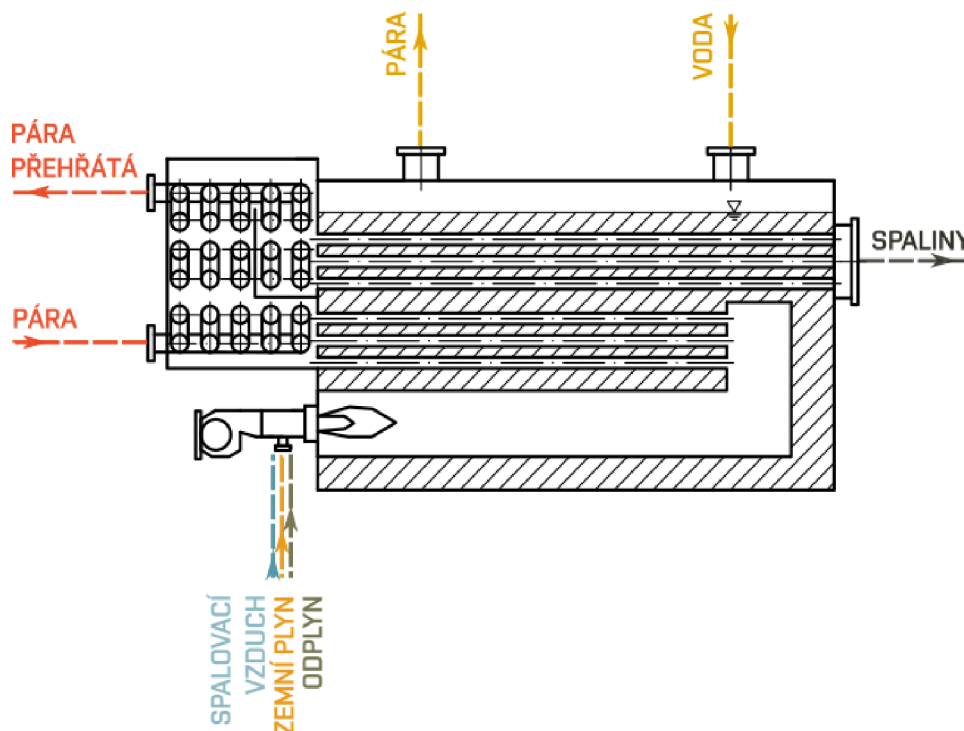
Ve spalovací komoře kotle je spalován odpadní plyn za přívodu zemního plynu a spalovacího vzduchu, jako tomu bylo u běžné spalovací komory. Řez reálným MIZ typu „žárotrubný kotel“ je na obrázku 23.



Obrázek 23: Vizualizace provedení žárotrubného kotle s přehřevem páry [24]

Při průchodu jednotlivými trubkami se předává produkované teplo mezi horkými spalinami a vodou za vzniku páry. Ta je v prostoru nad vodní hladinou vždy ve stavu sytosti, jedná se tedy o sytou páru. Pro výrobu přehřáté páry pro pohon parní turbíny je nutno sytou páru dále ohřát v dalším výměníku tepla zvaném přehřívák páry, který je umístěn v obrátové komoře spalin, kde dochází k předání tepla pro výrobu přehřáté páry. Umístění přehřevu páry uvnitř kotle snižuje ztráty tepla do okolí.

Sekce výparníku pro generování páry vyžaduje největší dodávku tepla, z tohoto důvodu je umístěna přímo za spalovací komorou. U zmíněného řešení je nespornou výhodou možnost dosažení podstatně vyššího tepelného zatížení radiální plochy výměny tepla než u procesních pecí (stovky kW/m^2) [25]. Jako materiál pro výrobu trubek jsou používány membránové stěny (s případnou ochrannou vrstvou podle agresivity spalin) [25]. Konstrukční návrh řešení je načrtnut na obrázku 24.

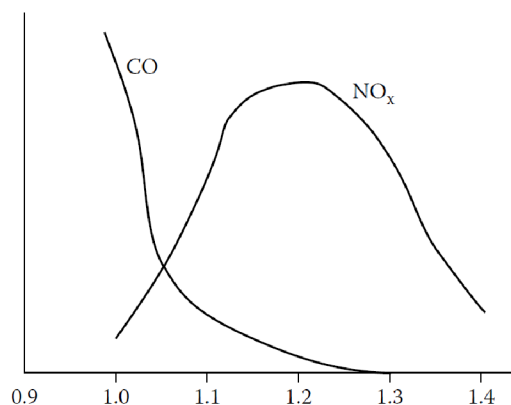


Obrázek 24: Žárotrubný kotel doplněný o přehřev páry

U tohoto integrovaného řešení bylo polemizováno nad možností jeho využití pro daný proces vzhledem k požadavkům na udržení vysoké teploty pro likvidaci znečišťujících látek, která je momentálně $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15]. Pokud uvažujeme chladicí účinek vody, která vyplňuje prostory kotle a dochází k odebrání tepla během procesu spalování, tak lze očekávat, že se sníží teplota procesu. Teplota potřebná pro zneškodnění je stanovována na základě zastoupení zneškodňovaných látek v odplyně a požadovaném stupni konverze pro dosažení předepsané zbytkové koncentrace, přičemž požadovaná teplota se může lišit, může být požadována výrazně vyšší, ale naopak i nižší hodnota. Tedy pro návrh nezohledňujeme toto kritérium jako omezující, přesto by měla být teplota spalin na konci plamencové komory stále na hodnotě alespoň $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby bylo zaručeno zneškodnění.

Faktorem, který zavedl významné změny v konstrukci kotlů a souvisejících systémů, jsou zpřísnující se emisní předpisy, kde je vyžadováno zmírnění dopadů výroby na životní

prostředí snížením produkce CO a NO_x . Jak již bylo zmíněno dříve, CO je produktem nedokonalého spalování a klesá v závislosti na rostoucím množství přiváděného spalovacího vzduchu, množství NO_x zpočátku roste s množstvím přiváděného spalovacího vzduchu a až následně začíná klesat [21]. Je tedy nutné uvažovat s vyšším než stechiometrickým přívodem spalovacího vzduchu v závislosti na požadovaných výstupních koncentracích znečišťujících látek. Samozřejmě větší množství vzduchu klade i dodatečné náklady na jeho ohřev, energii pro vhánění vzduchu do systému a vede k celkovému navýšení provozních nákladů, které je nežádoucí pro provozovatele. Z toho důvodu se hledají jiné alternativy, jak snížit koncentraci NO_x ve výstupním plynu. Když je množství přebytečného vzduchu větší než stechiometrické, teplota plamene se zvýší na určitou úroveň díky dobrému smíchání paliva a vzduchu, a proto se NO_x zvyšuje. S rostoucím přebytkem vzduchu je teplota spalování snižována v důsledku zvýšeného hmotnostního toku vzduchu a následného chladicího účinku. Současně při nízkém přebytku vzduchu je tvorba CO vysoká kvůli špatnému míchání mezi palivem a vzduchem. Vzájemná závislost obsahu obou plynů ve spalinách na přívodu spalovacího vzduchu je demonstrována na obrázku 25.

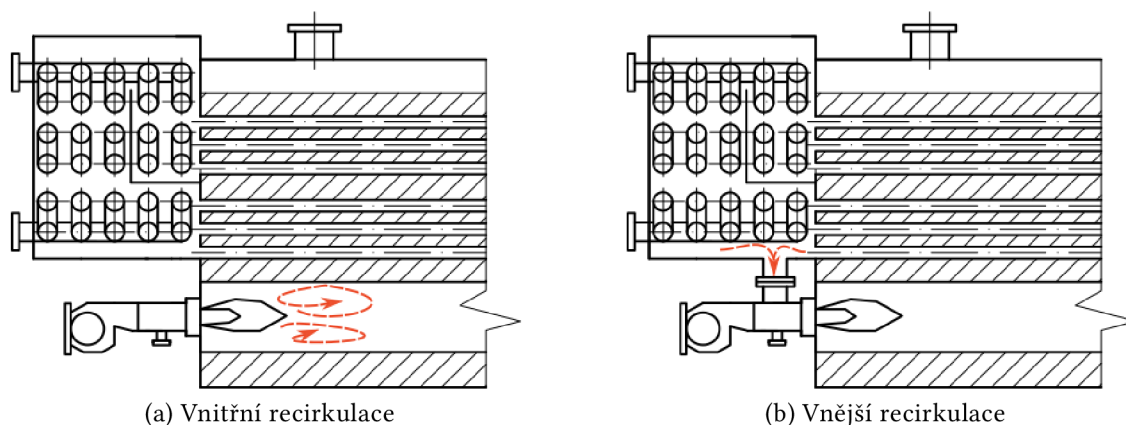


Obrázek 25: Množství spalovacího vzduchu v závislosti na produkci CO a NO_x [21]

Je tedy nutné zavést nové postupy snižování obsahu NO_x ve spalinách, než pouze upravovat množství přiváděného spalovacího vzduchu. Další možností je konstrukční úprava zařízení a zavedení recirkulace spalin, jak znázorňuje obrázek 26. U vnějšího provedení je vyžadováno konstrukčního zásahu. Obvykle je toto řešení realizováno pomocí obtoku (bypassu), který vede spaliny z výstupu opět na vstup. Toto provedení je rozměrově náročné a vyžaduje zařazení dalšího spojovacího potrubí. Možnou variantou pro snížení rozměrové a materiálové náročnosti tohoto provedení je propojení obratové komory spolu z hořákem, jak je vidět na obrázku 26b. Provozovatelé často nechtějí realizovat úpravy spojené s konstrukčním zásahem do stávajícího zařízení, a tak se objevuje možnost řešení zpětnou recirkulací spalin v oblasti plamencové komory, jak ukazuje obrázek 26a, čímž by bylo rovněž docíleno redukce množství NO_x .

4.3.1 Omezení produkce syté páry

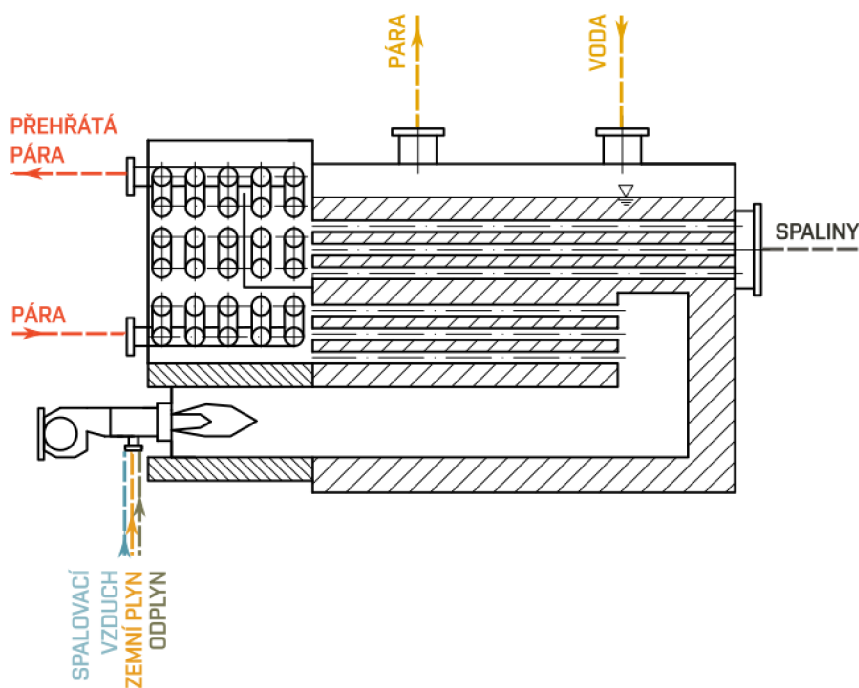
Vzhledem k faktu, že v předmětném provozu nezáleží na množství vyprodukované syté páry, nabízí se řešení, které by omezilo oblast kotle zatopené vodou, čímž by došlo ke



Obrázek 26: Recirkulace spalin v kotli

zvýšení teploty spalin proudících do přehříváku páry a ke zvýšení množství přehřáté páry, která je významná pro zisky provozu.

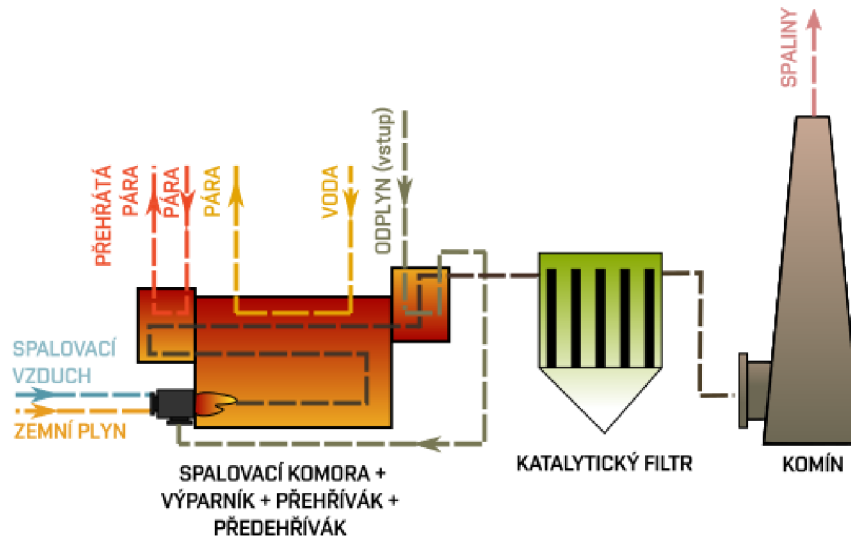
V podstatě se jedná o zmenšení zatopené oblasti, a tedy dochází ke zmenšení tepla odebraného na výrobu syté páry ve prospěch potřebného tepla pro přehřívák páry. Úprava slouží k maximalizaci množství přehřáté páry. Konstrukční řešení je znázorněno na obrázku 27. V oblasti mezi hořákem a přehřívákem by bylo nutné vybudovat izolační vrstvu, která by od sebe obě zařízení oddělovala a bránila lokálnímu přehřátí s následkem poškození zařízení.



Obrázek 27: Žárotrubný kotel s maximalizací tvorby přehřáté páry

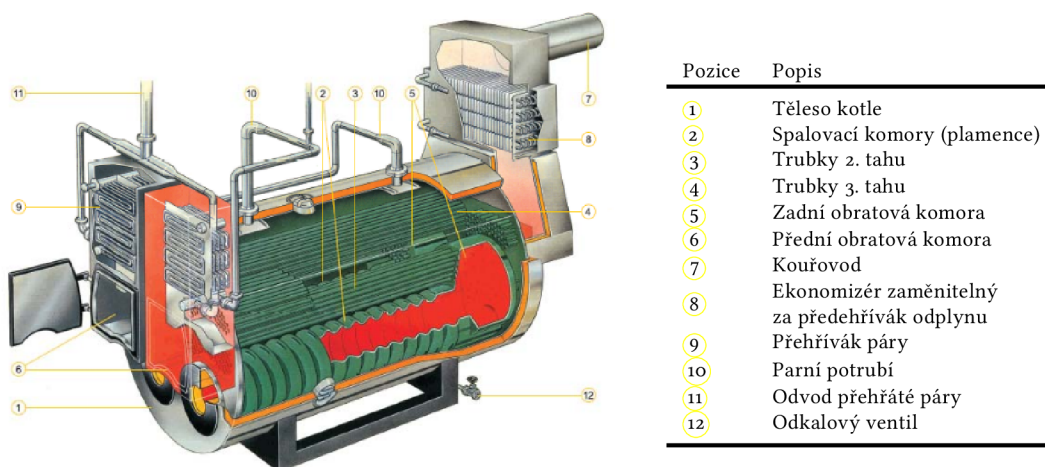
4.3.2 Žárotrubný kotel s přehřevem páry a předehřevem odplynu

Možnou úpravou žárotrubného kotle s přehřevem páry je přiřazení dalšího výměníku na výstupu z žárotrubného kotle a využití zbytkové energie vystupujících spalin. Výrobci standardně dodávají toto zařízení pro průmyslovou praxi se zařazeným ekonomizérem pro předehřev napájecí vody. Ekonomizér lze nahradit trubkovým výměníkem pro předehřev odpadního plynu. Celé modifikované schéma je znázorněno na obrázku 28.



Obrázek 28: Schéma modifikovaného procesu s MIZ typu „žárotrubný kotel se zařazeným přehřevem páry a předehřevem odplynu“

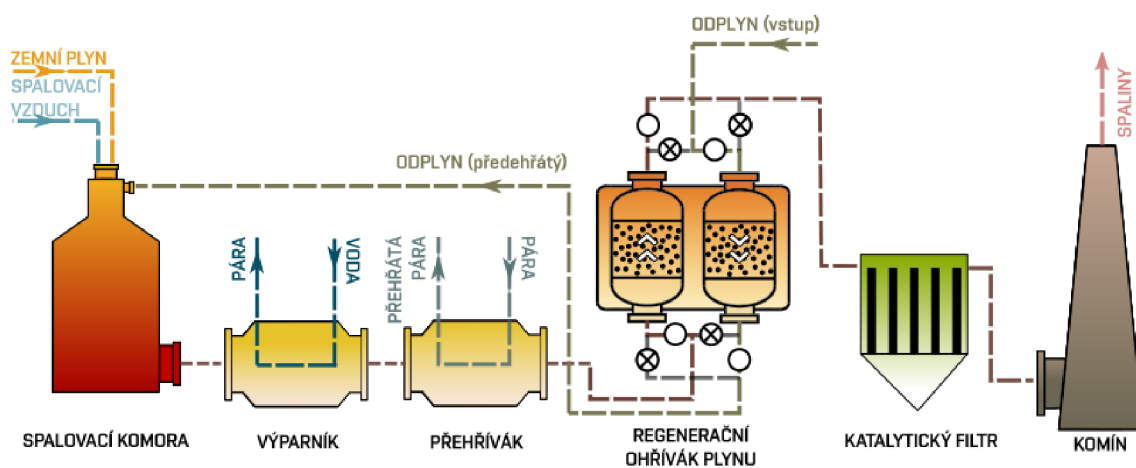
Řez žárotrubným kotlem s přehřevem páry a předehřevem odplynu s popisem jednotlivých částí je na obrázku 29, kde je zobrazena konstrukce s dvojitou plamencovou komorou. Spaliny proudí z obou hořáků odděleně plamencovou komorou až do zadní obratové komory. Tudíž nedochází k promíchání obou proudů spalin. Výhodou je relativně malý prostor pro instalaci a menší průměr plamencové komory, což znamená i menší nároky na tloušťku použitého plechu. Díky úplnému oddělení dvou spalovacích částí je umožněn také provoz pouze s jedním hořákem [26].



Obrázek 29: Žárotrubný kotel s přehřevem páry a předehřevem odplynu [27]

4.4 Modifikace procesu s potenciálním využitím MIZ typu „regenerátor“

Další variantou úpravy procesu je zařazení regeneračního výměníku tepla namísto rekuperačního typu. Toto provedení umožňuje jak výměnu tepla, tak zde může probíhat i čištění odpadních plynů, takže je lze s výhodou považovat za integrovanou jednotku, která je složena z tepelného výměníku a reaktoru. Nové výzkumy se zabývají regeneračním výměníkem tepla doplněným o katalytické lože, které by bylo schopné plně nahradit katalytický filtr pro čištění spalin, zařízení je zachyceno v kapitole 4.3 na obrázku 22. U regeneračního katalytického ohříváku plynu je nutné provést sestavení a experimentální ověření matematického aparátu popisujícího akumulaci tepla a chemické reakce v katalytickém loži multifunkční regenerativní výměny tepla před uvedením do průmyslového provozu. Schéma modifikovaného procesu se zařazeným regeneračním typem výměníku je zachyceno na obrázku 30.



Obrázek 30: Schéma modifikovaného procesu s regeneračním výměníkem pro předehřev odplynu

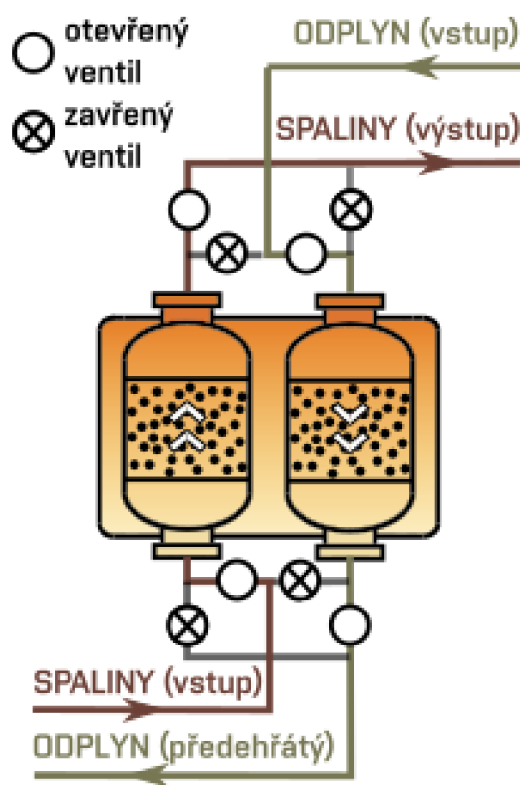
Podle režimu toku médií jsou regenerační výměníky dvojího typu:

- s pevným ložem a periodickým tokem médií
- rotační s kontinuálním chodem

Rotační regenerační výměníky jsou poháněny za pomoci rotoru, čímž dochází ke kontinuálnímu pohybu disku vytvořeného z velkého počtu tenkých profilovaných plechů, přes které prochází v opačných směrech teplé a studené médium, která jsou od sebe vzájemně oddělena potrubím spolu s těsněním [20]. Nevýhodou těchto ohříváků je menší těsnost a určité prolínání obou pracovních látek, což omezuje použití těchto výměníků. Teplo je akumulováno v disku a během otáčení přijde do kontaktu jak s teplým médiem, kterým se ohřívá, tak se studeným médiem, kterému předává teplo. Tímto způsobem dochází ke vzájemné výměně. Výstupní teplota médií není konstantní a liší se v závislosti na poloze v oblasti toku. Regenerační výměníky jsou používány pro teploty plynu až do 500 °C [28] a zejména pro předehřev spalovacího vzduchu pro kotle vysokých výkonů. V oblasti zneškodňování odpadů se nepoužívají.

Princip regeneračních výměníků s pevným ložem spočívá v přenášení tepla, které je dočasně akumulováno v pevném materiálu s dobrou tepelnou vodivostí. Obě média prochází střídavě přes tento "zásobník tepla". Horký plyn prochází póry skrz lože výměníku a část jeho tepla je tak přijímána ložem (tvořeného buď volně loženými nebo strukturovanými elementy). Průtok horkého plynu je následně zastaven a nahrazen přívodem studeného plynu, ten je přiváděn stejnými kanály a naakumulované teplo je předáváno z elementů zpět procházejícímu studenému plynu, čímž dochází k jeho přehřátí.

Popisu fungování se detailně věnuje [28], v regenerátoru s pevným ložem (viz obrázek 31) má proud daného média periodický charakter. Ventily se používají ke spínání proudění horkého a studeného proudu plynu. Z tohoto důvodu jsou provozovány v párech. To znamená, že dva nebo více regenerátorů se používají paralelně kvůli požadavku na nepřetržitý proud plynu. Během jedné části cyklu horký plyn protéká jedním z regenerátorů a ohřívá akumulací materiál, zatímco studený plyn protéká a ochlazuje akumulací materiál ve druhém regenerátoru. Oba plyny jsou v přímém kontaktu s akumulací elementy výplně v regenerátorech, i když ne oba současně, protože každý je v daném okamžiku v jiném regenerátoru. Po dostatečném čase se cyklus přepne a média jsou přetočena. Tento cyklus se trvale opakuje.



Obrázek 31: Regenerační výměník s pevným ložem

Jako výplň výměníku sloužící k akumulaci tepla lze použít různé materiály a tvary vhodné pro daný proces a typ zpracovávaného média. Lože je pro lepší uchování tepla tvořeno pevnými látkami z důvodu větší tepelné kapacity ve srovnání s plyny. Výběr materiálu lože závisí na daných podmínkách, fyzikálních vlastnostech plynů a především na teplotě. Pro velmi vysokou teplotu by měly být použity keramické materiály. Pro nižší teploty může být tepelně akumulací materiál vyroben z kovu (ocel nebo hliník).

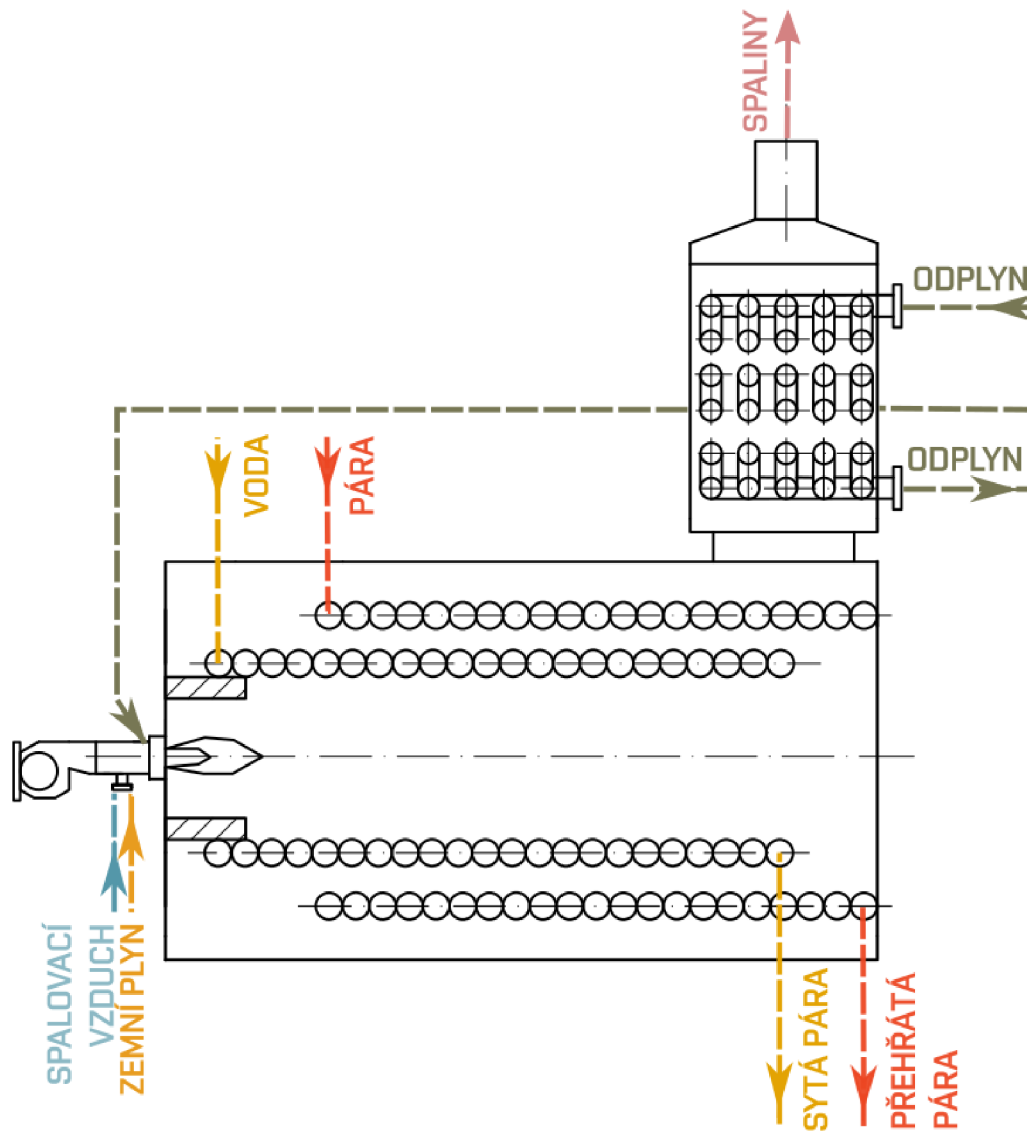
Porovnáním regeneračních a rekuperačních výměníků se více zabývá [28], kde je uvedeno, že regenerační typy výměníků jsou využívány především pro potřeby přenosu tepla mezi velkým množstvím plynů, které jsou znečištěné a způsobovaly by časté zanášení rekuperačních výměníků tepla, nebo pokud je plyn příliš horký nebo reaktivní. Regenerační tepelný výměník může poskytovat ve stejném objemu mnohem větší plochu pro přenos tepla při nižší tlakové ztrátě než rekuperační výměník tepla. Kromě toho má regenerační tepelný výměník ve většině případů lepší účinnost a jejich konstrukce je mnohem jednodušší. Výhodou regenerátorů oproti rekuperátorům je, že mají mnohem větší povrchovou plochu pro daný objem. Proto má regenerátor obvykle menší objem a hmotnost než rekuperátor pro ekvivalentní výkon. To znamená, že regenerátory jsou hospodárnější, pokud jde o materiály a výrobu. Výplňový materiál lože výměníku má určitý stupeň samočisticích charakteristik, kdy zachytává škodliviny obsažené v odpadním plynu. Výhodou regenerátorů oproti rekuperátorům je vyšší účinnost, vysoká teplota vstupního plynu a mnohem větší povrchová plocha pro daný objem. Jednou z nevýhod spojených s regenerátory je směšování obou proudů po přepnutí proudu. Ale v těch aplikacích, kde se používají tyto regenerativní tepelné výměníky, není dopad tohoto míchání tekutin obecně významný. Regenerátory jsou proto ideální pro výměnu tepla plyn-plyn.

Regenerace odpadního tepla je nezbytnou součástí zvyšování efektivity procesů ve vysokoteplotních aplikacích nebo energeticky náročných procesech. Například odpadní teplo obsažené v plynných prouděch z různých procesů lze použít k předehřátí spalovacího vzduchu nebo jiného procesního média. Toto předehřívání může výrazně zlepšit účinnost daného procesu, a proto bude s touto konfigurací dále pracováno v praktické části práce.

4.5 Potenciál MIZ typu „spalovací ohříváč“

Zatímco všechny předchozí návrhy modifikací procesu se opírají o zařízení, s nimiž je v České republice konkrétní zkušenost, nyní představená koncepce MIZ není u nás dosud běžně využívána. Zařízení tohoto typu jsou však běžně užívány v zahraničí, například v Německu. Nyní představované MIZ umožňuje zahrnout do jednoho zařízení všechny požadované funkce, které jsou v současném procesu používány a vytváří tak velmi kompaktní provedení pro zneškodňování plynného odpadu. Klíčovou částí MIZ je spalovací komora doplněná o šroubovicově stočené trubky, ve kterých dochází k přenosu tepla mezi vzniklými spalinami a vodou. V návaznosti na počet zařazených okruhů se stočenými trubkami se odvíjí počet chodů spalin kolem spirály a počet možných aplikací. Při n -chodů spalin je obdrženo $n - 1$ okruhů, ve kterých proudí ohřívané médium. Pro aplikaci ve stávajícím provozu je vyžadováno tříchodé provedení, do prvního spirálově stočeného trubkového hadu je přiváděna voda a ohřívána na stav syté páry. V další teplosměnné ploše je zařazena nízkotlaká pára a odevzdáním tepla ze spalin jsou zvýšeny parametry na přehřátou páru. Okruhy jsou soustředně orientovány jeden uvnitř druhého lišící se poloměrem zakřivení. Hořák je umístěn uprostřed vnitřní spirály, která je tak vystavena jak radiačnímu, tak i konvekčnímu přenosu tepla. Ve třetím chodu dochází ke sdílení tepla pouze konvekcí, dále směřují spaliny ven z kotle. Zbytková energie spalin je před průchodem komínem využita ve výměníku se svazkem trubek na předehřátí zneškodňovaného odpadního plynu za účelem zvýšení účinnosti. Schéma zařízení je znázorněno na obrázku 32.

Přestože se jedná o jedinou kompaktní jednotku, je zabráněno vzájemnému prosa-



Obrázek 32: Modulární provedení kotle se šroubovicově stočenými trubkami

kování médií konstrukcí s oddělenými okruhy ze šroubovicově stočených trubek. Směr průchodu ve spirálách musí být protiproudý z důvodů ochrany materiálu trubek v první obrátové oblasti, kde teplota spalin dosahuje stále vysokých hodnot. Z důvodů zabránění přehřátí materiálu trubkového hadu je ve spodní oblasti, kde se spaliny otáčejí a vstupují do dalšího chodu, spalovací komory vháněna nízkotlaká pára a na konci druhého chodu opouští kotel jako pára přehřátá. V případě souprůdé orientace přehřívání páry by hrozilo přehřátí materiálu trubek a zkrácení životnosti přehříváku.

Předností představeného integrovaného zařízení je vysoká tepelná účinnost, která běžně dosahuje 85 %. Při zařazení předehřevu odplynu se toto procento dokonce zvyšuje, běžně o 3 – 5 %, jak například uvádí výrobce zařízení Heatec [29]. Zařízení je běžně používáno i pro ohřev teplotonosičů, jako jsou termoleje apod. Vyrábí se nejen v horizontálním (viz obrázek 32), ale i ve vertikálním provedení.

5 Hodnocení navržených modifikací procesu a koncepcí MIZ

Odhady nákladů na zařízení a další náklady spojené s kapitálovými investicemi hrají klíčovou roli při výběru z různých alternativ návrhu. Tato kapitola představuje výpočetní rovnice pro stanovení počátečních odhadů cen zařízení a využívá užívanou metodu Venture Profit (podnikový zisk) pro stanovení výhodnosti koncepce. Ta počítá s ročními výdělky a náklady, vycházejících z poznatků o jednotlivých zařízeních. Předběžné odhady investičních nákladů na nová zařízení a zpracovatelské závody jsou stanoveny dle cen od dodavatelů a na základě literatury [30]. Veškeré výpočty jsou provedeny v Příloze 2 této diplomové práce.

5.1 Venture Profit jako kritérium hodnocení

„Venture profit“ (dále jen VP) představený v [30], lze volně přeložit jako tzv. rizikový zisk, jež byl vytvořen jako specifické technicko-ekonomické kritérium, které literatura [30] doporučuje používat především pro předběžné odhady a porovnávání alternativních provedení procesních schémat ve fázi syntézy procesu či při koncepčním návrhu uspořádání procesu nebo jeho modifikací. VP je tedy velmi vhodným kritériem právě pro naše potřeby – tj. pro rychlé vzájemné zhodnocení navržených modifikací procesu a koncepcí MIZ představených v předchozí kapitole. VP je dle [30] definován jako přibližná míra ziskovosti potenciálního procesu nebo produktu, jež bere v úvahu velikost a provedení, resp. uspořádání procesu. Matematicky je VP vyjádřen dle [30] jako čistý roční zisk převyšující minimální akceptovatelnou návratnost celkových investic a je v základní obecné podobě vyjádřen vztahem:

$$VP = CRZ - i_{min} \cdot C_{CI}, \quad (26)$$

v němž,

- VP je předmětný roční rizikový zisk [Kč/rok];
- CRZ je čistý roční zisk (net earnings) [Kč/rok], jež se dle [30] stanovuje z roční provozní doby procesu a nákupních cen surovin a prodejních cen produktů procesu;
- i_{min} je minimální akceptovatelná návratnost investice [rok^{-1}], jež se dle [30] doporučuje volit typicky v rozmezí 10–20 %, tj. $i_{min}=0.1-0.2$;
- C_{CI} je hodnota (cena) celkových investic [Kč], která se má dle [30] stanovit jako suma aktuálních pořizovacích cen jednotlivých procesních zařízení.

Použijeme-li kritérium VP specifikované právě popsanou rovnicí (26) na hodnocení předmětného procesu energetického využití plyných odpadů (tj. procesu „waste-to-energy“, tj. WtE) a vyjdeme-li z jeho výchozího provedení dle obrázku 10 a předpokladu obvyklé reality, kdy je obvykle provozovatelem a současně i vlastníkem tohoto WtE procesu producent zneškodňovaného plyného odpadu (tj. nákupní cena plyného odpadu pro WtE proces je nulová), potom je z pohledu takového provozovatele procesu WtE zřejmé, že do položky CRZ v rovnici (26) je z pohledu „nákupních cen na suroviny“ možné zahrnout cenu za zemní plyn, cenu za napájecí vodu a cenu za elektrickou energii

pro pohon dopravních strojů pracovních látek procesu (tj ventilátorů, čerpadel) a z pohledu „prodejních cen produktů“ pak cenu za vyrobenou sytou páru a cenu za vyrobenou přehřátou páru. Za předpokladu, že se navrhovanými modifikacemi procesu, resp. implementacemi MIZ nezmění stávající náročnost procesu WtE z pohledu spotřeby elektrické energie na dopravní stroje pracovních látek, pak tuto položku (tj. cena elektrické energie) není třeba do kalkulace zahrnovat. Položku C_{CI} v rovnici (26) (tj. cenu celkových investic, jež se má dle [30] stanovit jako suma aktuálních pořizovacích cen jednotlivých procesních zařízení) je třeba stanovit z pořizovacích cen jednotlivých zařízení, resp. MIZ. K tomu je třeba disponovat vhodnými cenovými modely jednotlivých zařízení, resp. MIZ, buď vlastními nebo z dostupné literatury. Cenové modely použité v této práci pro vyjádření položky C_{CI} pro potřeby srovnání navržených variant procesu WtE budou představeny v následující kapitole 5.2.

5.2 Investiční náklady na jednotlivé aparáty

Vůči stávajícímu provedení procesu (obr. 17 resp. 19) bude konkrétně posuzováno pět navržených modifikací procesu WtE využívajících MIZ a představených v kapitole 4 (varianty dle obrázků 20, 21, 22, 28 a 30). Nebude posuzována varianta dle obr. 32, jež je uváděna pouze jako doplňková specifická varianta nad standardní rámec zaměření diplomové práce. Všechny vzájemně posuzovaná provedení procesu, tj. obr. 19, 20, 21, 22, 28 a 30, obsahují pro kompletnost znázornění i katalytický filtr, jež však reálně není v provozovaném provedení procesu (viz obr. 17) přítomen. Z tohoto důvodu tedy nebude toto zařízení do posuzování zmíněných variant reprezentovaných obrázky 19, 20, 21, 22, 28 a 30 zohledněno. Pro srovnání je tedy potřeba disponovat cenovými modely pro predikci aktuálních pořizovacích nákladů na tato konkrétní zařízení a MIZ: (i) spalovací komora, (ii) MIZ typu spalovací komora a deskový výměník v jednom, (iii) trubkový výparník, (iv) trubkový přehřívák páry, (v) trubkový ohřívák odplynu, (vi) MIZ typu žárotrubný kotel obsahující spalovací komoru/výparník a trubkový přehřívák páry, (vii) MIZ typu žárotrubný kotel obsahující spalovací komoru/výparník, trubkový přehřívák páry a trubkový ohřívák, (viii) regenerační ohřívák. Pořizovací cena posledně zmíněného zařízení, tj. regeneračního ohříváku bude převzata z [13]. Použité cenové modely pro určení zbývajících zmíněných zařízení a MIZ budou nyní představeny.

Cenové modely jsou popsány rovnicemi, které vždy pracují s klíčovým parametrem pro popisované zařízení, označeným v rovnici (27) jako *promenna*. Obecný tvar vycházející z [30] je následující:

$$Cena = konst1 \cdot promenna^{konst2} \quad (27)$$

Vytvořené korelace jsou platné pro rok 2020. Stanovení vztahů, které v závislosti na klíčových parametrech charakterizujících zařízení vedou k přibližnému určení ceny, aby bylo možné získat jistou představu o finanční náročnosti uvažovaného řešení. Je důležité mít na paměti, že hodnoty jsou orientační a výsledná cena bude stanovena dodavatelem dle specifických požadavků zákazníka.

5.2.1 Investiční náklady na spalovací komoru

Pro specifika provedení je uvažována spalovací komora z vláknitých vyzdívek spolu s žárotrubným dnem, klíčovým parametrem je průtok zpracovávaného odpadního

plynu, který vystupuje ve vztahu:

$$C_{SK} = 47\,925 \cdot \dot{V}_O^{0.45} \quad (28)$$

Pro zadaný provoz jsou známy hmotnostní průtoky obou odplynů, jedná se o hlavní a vedlejší proud, které se před spalovací komorou spojují a jsou zneškodňovány současně. K získání objemového průtoku je nutné stanovit hustotu směsi pro každou větev odplynu, aby následně bylo možné pomocí stavové rovnice (13 převést získané hodnoty na normální podmínky ($T=0^\circ\text{C}$, $p=101325\text{ Pa}$). Pro neměnné látkové množství plynu, resp. neměnnou hmotnost téhož plynu platí následující rovnice:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1}, \quad (29)$$

kteří lze využít k přepočtu na normální podmínky.

Hustota plynu je spočítána pomocí programu Maple 2020 [18], níže v tabulce 7 jsou hodnoty pro jednotlivé větve zpracovávaného odpadního plynu při jejich provozních podmínkách (teplotě a tlaku), z nich získané objemové průtoky dle rovnice (30), v posledním řádku je přepočtena hodnota objemového průtoku při normálních podmínkách (NP) dle rovnice (29).

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}, \quad (30)$$

kde \dot{m} je hmotnostní průtok zpracovávaného odplynu a ρ jeho hustota.

Tabulka 7: Parametry hlavního a vedlejšího odpadního plynu

	Hlavní odplyn	Vedlejší odplyn	SUMA
Hmotnostní průtok [$\frac{\text{kg}}{\text{h}}$]	16 594.2	2 113.1	
Hustota [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	0.5	1.4	
Objemový průtok [$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$]	32 810.5	1 521.7	
Objemový průtok za NP [$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$]	13 928.1	1 581.3	15 509.3

Pořizovací náklady na spalovací komoru jsou vyčísleny dle vytvořené korelace (viz Příloha 2 této práce) pro zkoumaný provoz dosazením objemového průtoku zpracovávaného odplynu za NP:

$$C_{SK} = 3\,684\,080 \text{ Kč.}$$

5.2.2 Investiční náklady na trubkový výměník

Pro stanovení investičních nákladů pro trubkové výměníky C_{VT} v Kč je použit vztah uváděný v [30]:

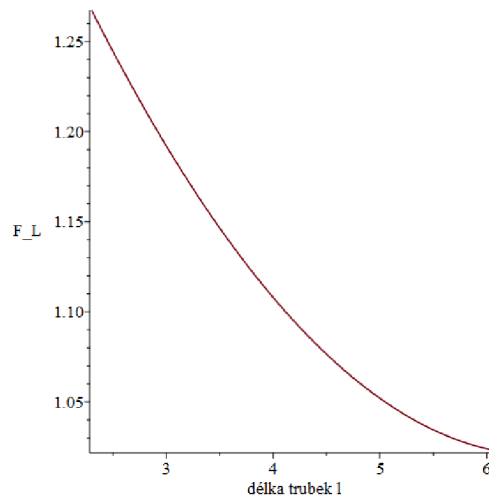
$$C_{VT} = F_{P_{VT}} \cdot F_M \cdot F_L \cdot C_B, \quad (31)$$

kde $F_{P_{VT}}$ je faktor zohledňující tlak v plášti výměníku, F_M je korekční faktor charakterizující typ použitého materiálu, z kterého je vyroben plášť a trubkový svazek, F_L je korekce na délku trubek výměníku a C_B je základní cena za zařízení.

Vztah pro korekční faktor F_L na délku trubek výměníku byl navržen dle hodnot uvedených v literatuře [30] získaný vztah je představen rovnicí:

$$F_L = 0.014 \cdot L^2 - 0.182 \cdot L + 1.612, \quad (32)$$

kde L je délka trubek výměníku v metrech. Jak je patrné z obrázku 33, korekční faktor klesá společně s rostoucí délkou.



Obrázek 33: Závislosti velikosti korekčního faktoru F_L na délce trubek výměníku l

Faktor zohledňující působící tlak P v MPa ve výměníku je stanoven dle následující rovnice:

$$F_{P_{VT}} = 0.9803 + 0.018 \cdot \left(\frac{P \cdot 145}{100} \right) + 0.0017 \cdot \left(\frac{P \cdot 145}{100} \right)^2 \quad (33)$$

Korelace pro výpočet základní ceny za trubkový výměník C_B , která přibližně platí pro provedení s pevnými trubkovnicemi, je stanovena na základě cenových nabídek od dodavatele v souladu s odbornou literaturou [30]. Získaný vztah je závislý na velikosti plochy výměny tepla, která je do následující rovnice dosazována v m^2 :

$$C_B = 25\,325 \cdot A_{VT}^{0.97}. \quad (34)$$

Velikost korekčního faktoru zohledňující použitý typ materiálu na plášť a trubkový svazek výměníku je vypočtena za pomoci konstant a a b , které reprezentují použitý materiál, jejich hodnoty pro nejběžněji používané materiály jsou uvedeny v tabulce 8. Vztah pro výpočet F_M má pak tvar:

$$F_M = a + \left(\frac{A \cdot 10.76}{100} \right)^b \quad (35)$$

Dosazením vztahů (32)-(35) do rovnice (31) je získán finální vztah pro výpočet ceny tepelného výměníku.

Tabulka 8: Konstanty a a b z rovnice 35 charakterizující použitý typ materiálu [30]

Použitý materiál	a	b
Plášť/Trubky	rov.35	rov.35
Uhlíková ocel/uhlíková ocel	0.00	0.00
Uhlíková ocel/mosaz	1.08	0.05
Uhlíková ocel/nerezová ocel	1.75	0.13
Uhlíková ocel/monel	2.1	0.13
Uhlíková ocel/titan	5.2	0.16
Uhlíková ocel/Cr-Mo ocel	1.55	0.05
Cr-Mo ocel/Cr-Mo ocel	1.70	0.07
Nerezová ocel/nerezová ocel	2.70	0.07
Monel/monel	3.3	0.08
Titan/titan	9.6	0.06

Investiční náklady na výparník

Stanovení investičních nákladů pro výparník je provedeno dle rovnic (31)-(35) se zohledněním veškerých vstupních parametrů pro výpočet, kterými jsou provozní tlak v zařízení P , plocha výměny tepla A a délka trubek výměníku l . Jako konstrukční materiál trubek je uvažována nerezová ocel a plášť z uhlíkové oceli. Po dosazení byla stanovena cena za výparník:

$$C_{VT_{vyp}} = 5\,497\,260 \text{ Kč.}$$

Investiční náklady na přehřívák páry

Obdobně je stanovena cena za přehřívák páry, která dle korelace vychází následovně:

$$C_{VT_{preh}} = 6\,192\,617 \text{ Kč.}$$

Investiční náklady na předehřívák odplynu

Pro použitý předehřívák odplynu je charakteristická velká plocha výměny tepla, která činí $A_{pred} = 277.43 \text{ m}^2$, po dosazení do rovnice 34 a stanovení korekčních faktorů (materiál pláště a trubek je uvažován stejný jako v případě výparníku a přehříváku) jsou investiční náklady na předehřívák odplynu určeny na:

$$C_{VT_{pred}} = 5\,908\,470 \text{ Kč.}$$

5.2.3 Investiční náklady na MIZ typu „koaxiál“

Další vytvořená cenová korelace je pro modifikaci procesu uvedené na obr. 20, jež (oproti výchozímu provedení procesu na obr. 19) zařazuje MIZ typu „koaxiál“ sdružující spalovací komoru a deskový výměník do jednoho aparátu. Korelace pro odhad ceny byly vytvořeny na základě reálných nabídek a zpracovány v souladu s odbornou literaturou [30].

Pro koaxiální zařízení je klíčovým parametrem průtok zpracovávaného odpadního plynu. Tedy jako proměnná v rovnici (27) se bude vyskytovat objemový průtok v m_N^3 :

$$C_{koax} = 103\,139 \cdot \dot{V}_O^{0.46} \quad (36)$$

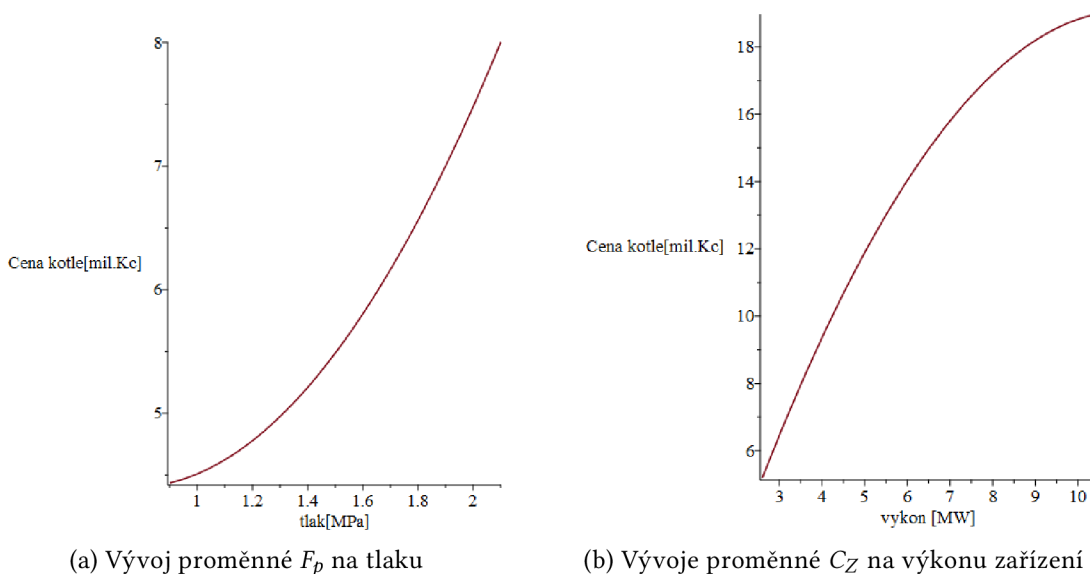
Po dosažení hodnoty objemového průtoku, jehož hodnota je v tabulce 7 je stanovena cena za koaxiální zařízení:

$$C_{koax} = 8\,731\,640 \text{ Kč.}$$

5.2.4 Investiční náklady na MIZ typu „žár trubný kotel“

Charakteristické veličiny pro kotel jsou tlak a výkon, které jsou rozhodující při výběru vhodného typu. Z těchto důvodů byla vytvořena cenová korelace ve vztahu k těmto dvěma parametrům. Z dostupných cenových údajů od dodavatelů byly vytvořeny funkční závislosti a ty následně zobecněny v závislosti na tlaku a výkonu zařízení, aby bylo možné univerzální použití pro širší spektrum tlaků a výkonů.

Na obrázku 34a je možné vidět vztah mezi tlakem a cenou zařízení pro neměnný výkon. Jedná se o polynomický rozvoj druhého stupně, který byl získán aproximací metodou nejmenších čtverců, aby bylo možné, co nejlépe vystihnout jednotlivé ceny. Vzhledem k potřebám utvoření závislosti vedle tlaku také na výkonu, který je druhým klíčovým parametrem charakterizující kotel, byly vzaty hodnoty pro různé výkony a jeden tlak a opět za pomoci metody nejmenších čtverců vytvořena funkční závislost, pro kterou byla znovu shledána jako nejvýhodnější kvadratická aproximace. Závislost ceny kotle na výkonu při neměnném tlaku je vidět na obrázku 34b.



Obrázek 34: Grafy vývoje proměnných rovnice C_K

Trend vytvořených aproximací je předpokládán obdobný i pro jiné hodnoty výkonu, resp. tlaku, je uvažováno pouze s posunutím křivky ve vertikálním směru.

Vzhledem ke dvěma závislostem, které jsou pro kotel řešeny, je rovnice cenové korelace uvažována ve tvaru:

$$C_K = C_Z \cdot F_p, \tag{37}$$

kde C_K představuje celkovou cenu za zařízení v milionech Kč, C_Z pak závislost ceny v milionech Kč na výkonu zařízení a F_p slouží jako korekce na měnící se tlak v MPa. Obě

dvě veličiny jsou zastoupeny polynomy druhého stupně, které byly získány jako rovnice charakterizující průběhy vývoje cen reálných zařízení v závislosti na výkonu a tlaku. Odvozeny byly následující cenové korelace:

$$C_Z = -0.16239 \cdot Q_{kotel}^2 + 3.62601 \cdot Q_{kotel} - 3.87956, \quad (38)$$

Q_{kotel} představuje výkon kotle dosazovaný v MW. Pro korekci na tlak je situace následující:

$$F_p = 0.45889 \cdot p^2 - 0.7069 \cdot p + 1.26451, \quad (39)$$

kde p je tlak v zařízení v MPa.

Po dosazení rovnic (39) a (38) do (37) je obdržena finální vztah pro výpočet celkové ceny kotle v závislosti na tlaku a výkonu.

$$C_K = (-0.16239 \cdot Q_{kotel}^2 + 3.62601 \cdot Q_{kotel} - 3.87956) \cdot (0.45889 \cdot p^2 - 0.7069 \cdot p + 1.26451)$$

Uvedený cenový model pro MIZ typu „žárotrubný kotel“ uvažuje provedení zahrnující hořák, spalovací komoru/výparník a přehřívák páry. V případě, že je toto MIZ bez hořáku (tj. jde o žárotrubný kotel na odpadní teplo – viz obr. 21), uvažuje se při odhadu ceny hodnota vypočtená z rovnice (37) vynásobená korekčním faktorem o hodnotě 0.95 na nepřítomnost hořáku. Naopak v případě, kdy toto MIZ obsahuje (kromě hořáku, spalovací komory/výparníku a přehříváku) navíc i přehříváček (viz obr. 28) uvažuje se při odhadu ceny takového provedení MIZ hodnota vypočtená z rovnice (37) vynásobená korekčním faktorem o hodnotě 1.25 na přítomnost přehříváče.

Po vypočtení cenové korelace pro kotel na odpadní teplo, který je na obrázku 21 je obdržena cena:

$$C_{KOT} = 5\,322\,774 \text{ Kč.}$$

Pro kotel na odpadní teplo platí zachování výkonu pro výparník i přehřívák (uvedeny v tabulce 4), tedy celé zařízení má výkon 2.54 MW kvůli zachování parametrů jak vyráběné syté páry, tak i přehřáté páry proudící na turbínu.

Pro žárotrubný kotel, který je součástí procesu na obrázku 22, je vypočtená cena za zařízení:

$$C_{ZK} = 5\,602\,920 \text{ Kč.}$$

Rozdíl mezi kotlem na odpadní teplo spočívá v zařazení hořáku, který činí pouze 5 % nárůst ceny celkových nákladů na zařízení.

Poslední uvažovanou variantou využití průmyslového kotle je provedení se zařazeným ohřívákem odplynu, tj. obrázek 28. Pro tuto variantu dochází k nárůstu výkonu kotle oproti předchozím řešením způsobeným doplněním o výkon přehříváku, celkový výkon zařízení je pak součet hodnot uvedených v tabulce 4, tedy 4.52 MW. Navíc je počítáno s čtvrtinovým nárůstem ceny na přítomnost přehříváče, který je spojen s doplňkovou implementací. Tedy cena takového zařízení je:

$$C_{ZKs\text{predehrevem}} = 15\,032\,055 \text{ Kč.}$$

5.2.5 Investiční náklady na MIZ typu „regenerátor“

Cena byla převzata z diplomové práce [13], kde byla řešena úprava procesu s využitím regeneračního ohříváku odplynu, investiční náklady byly stanoveny na $C_{REG}=6\,463\,200$ Kč při užití keramických kuliček o průměru 20 mm jako sypané náplně.

5.3 Hodnocení navrhovaných řešení

Nyní bude využito technicko-ekonomického kritéria Venture Profit pro nalezení nejvýhodnější koncepce řešení z pohledu ziskovosti s využitím poznatků o investičních nárocích na zařízení, které byly stanoveny v kapitole 5.2.

5.3.1 Venture Profit stávající provozované jednotky „waste-to-energy“

Stávající provozovaná jednotka je složena z 5 zařízení: spalovací komory, výparníku, přehříváku páry, předehříváku odplynu a komínu. Komín je nedílnou součástí každé koncepce, modifikace procesu jeho konstrukci neovlivňují, tedy ani jeho cenu, která bude pro všechny varianty stejná. Z tohoto důvodu není počítáno s cenou komínu, která by výběr nejvhodnější varianty neovlivnila.

Dle rovnice (26) je stanoven roční rizikový zisk pro stávající provozovanou jednotku. Čistý roční zisk CRZ je stanoven na základě roční provozní doby zařízení r , která je zvolena dle běžné provozní doby průmyslových podniků jako 330 dní. Dále hodnotu ovlivňuje nákupní cena suroviny, kterou je ve zkoumaném případě zemní plyn, jeho cena C_{ZP} je 8 Kč/m³ [13], a napájecí voda, jejíž cena C_{NV} je k 18.6.2020 stanovena na 51.7 Kč/m³ [31]. Produktem vystupujícím z procesu je pára vzniklá využitím odpadního tepla ve výparníku a přehříváku páry. Prodejní cena syté páry C_{SP} je stanovena dle [13] na 123 Kč/GJ, cena přehřáté páry je pak nepatrně vyšší $C_{PP}=150$ Kč/GJ (hodnota poskytnutá vedoucím této práce doc. Ing. Zdeňkem Jeglou, Ph.D.). Obecný tvar výpočtu hodnoty CRZ pro stávající provozovanou jednotku:

$$CRZ_{SPJ} = r \cdot h \cdot (10^{-6} \cdot (\dot{m}_{SP} \cdot h_{SP} \cdot C_{SP} + \dot{m}_{PP} \cdot h_{PP} \cdot C_{PP}) - (\dot{V}_{ZP} \cdot C_{ZP} + \dot{V}_{NV} \cdot C_{NV})), \quad (40)$$

kde h představuje počet hodin za den kvůli jednotkové konzistenci, h_{SP} je měrná entalpie syté páry v kJ/kg při teplotě 165 °C a tlaku 0.7 MPa, \dot{m}_{PP} je hmotnostní průtok přehřáté páry v kg/h a h_{PP} je měrná entalpie přehřáté páry v kJ/kg při teplotě 300 °C a tlaku 1.57 MPa. Měrné entalpie obou parních proudů byly stanoveny pomocí programu SteamTab [32]. Velikosti hmotnostních průtoků obou parních proudů a objemového průtoku zemního plynu a napájecí vody v procesu jsou v tabulce 9.

Tabulka 9: Průtoky parních proudů, zemního plynu a napájecí vody

Parametr	Velikost
\dot{m}_{SP}	2 524 kg/h
\dot{m}_{PP}	13 000 kg/h
\dot{V}_{ZP}	263.1 m ³ /h
\dot{V}_{NV}	38.5 m ³ /h

Dosažením všech hodnot do rovnice (40) lze určit velikost členu CRZ pro stávající provedení následovně:

$$CRZ_{SPJ} = 330 \cdot 24 \cdot (10^{-6} \cdot (2524 \cdot 2762.8 \cdot 123 + 13000 \cdot 3036.3 \cdot 150)) - (263.1 \cdot 8 + 38.5 \cdot 51.7) = 21\,247\,420 \text{ Kč.}$$

Minimální akceptovatelná návratnost investice i_{min} je zvolena pro potřeby výpočtu jako maximální doporučená krajní hodnota 20 %. Pro stanovení velikosti C_{CI} je využito poznatků z kapitoly 5.2, kde jsou určeny aktuální pořizovací ceny jednotlivých procesních zařízení, parametr C_{CI} je pak suma všech zařízení, z kterých je proces složen. Pro stávající provozovanou jednotku má tvar:

$$C_{CI\,SPJ} = C_{SK} + C_{VT_{vyp}} + C_{VT_{preh}} + C_{VT_{pred}} \quad (41)$$

Po vyčíslení:

$$C_{CI\,SPJ} = 3\,684\,080 + 5\,497\,260 + 6\,192\,617 + 5\,908\,470 = 21\,282\,428 \text{ Kč}$$

Nyní jsou známy všechny členy pro číselné vyhodnocení kritéria VP:

$$VP = 21\,247\,419 - 0.2 \cdot 21\,282\,427 = 16\,990\,934 \text{ Kč}$$

Shrnutí velikosti jednotlivých členů a celkového VP pro stávající provozovanou jednotku je v tabulce 10.

Tabulka 10: Shrnutí VP pro stávající zkoumanou jednotku

Člen	CRZ	i_{min}	C_{CI}
Velikost	21 247 420 Kč	0.2	21 282 428 Kč
VP			16 990 934 Kč

5.3.2 Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.1

Modifikace procesu spočívá v nahrazení spalovací komory a výměníku pro předehřev odplynu za jednu kompaktní jednotku „koaxiál“. Využitím MIZ je odhadována úspora paliva 3 % oproti původní spotřebě. Výparník a přehřívák zůstávají touto úpravou nezměněny. Člen CRZ po úpravě pro MIZ typu „koaxiál“ vypadá následovně:

$$CRZ_{koax} = r \cdot h \cdot (10^{-6} \cdot (m_{SP} \cdot H_{SP} \cdot C_{SP} + m_{PP} \cdot H_{PP} \cdot C_{PP}) - (0.97 \cdot \dot{V}_{ZP} \cdot C_{ZP} + \dot{V}_{NV} \cdot C_{NP})). \quad (42)$$

Pro zachování porovnatelnosti všech koncepcí bude hodnota minimální akceptovatelné návratnosti investice i_{min} volena vždy jako 20 %. Investiční náklady jsou v této modifikaci zastoupeny cenou za koaxiální zařízení, výparník a přehřívák.

$$C_{CI\,koax} = C_{koax} + C_{VT_{vyp}} + C_{VT_{preh}}. \quad (43)$$

Tabulka 11 ukazuje výsledky pro MIZ typu „koaxiál“.

Tabulka 11: Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „koaxiál“

Člen	CRZ	i_{min}	C_{CI}
Velikost	21 747 520 Kč	0.2	20 421 517 Kč
VP			17 663 217 Kč

5.3.3 Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.2

Modifikace navazuje na zařazení koaxiálního zařízení a řeší spojení výparníku a přehřívaku v další MIZ „kotel na odpadní teplo“ z obrázku 21. Pro tuto koncepci jsou tedy celkově zařazeny dvě MIZ, kde u každého je počítáno s úsporou 3 % paliva, což v součtu dává 6% úsporu a dojde tak ke zvýšení čistého ročního zisku CRZ dle následující cenové korelace:

$$CRZ_{KOT} = r \cdot h \cdot (10^{-6} \cdot (m_{SP} \cdot h_{SP} \cdot C_{SP} + m_{PP} \cdot h_{PP} \cdot C_{PP}) - (0.94 \cdot \dot{V}_{ZP} \cdot C_{ZP} + \dot{V}_{NV} \cdot C_{NP})). \quad (44)$$

Hodnotu celkových investic $c_{CI\ koax}$ tvoří pořizovací cena za koaxiální zařízení a kotel na odpadní teplo:

$$C_{CIKOT} = C_{koax} + C_{KOT}. \quad (45)$$

Obdržené výsledky pro modifikaci s kotlem na odpadní teplo jsou shrnuty v tabulce 12.

Tabulka 12: Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „kotel na odpadní teplo“

Člen	CRZ	i_{min}	C_{CI}
Velikost	22 247 621 Kč	0.2	14 054 414 Kč
VP			19 436 738 Kč

5.3.4 Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.3

Na obrázku 22 je provedení s žárotrubným kotlem, kde dochází ke spalování odplynu v plamencové komoře, odpadní teplo je využíváno pro výrobu syté a přehřáté páry přímo v kotli. Parametry obou par jsou ponechány beze změny. Na výstupu z kotle je zařazen regenerační výměník, který má větší účinnost než klasický trubkový díky efektivnějšímu předávání tepla mezi oběma médii způsobené dokonalejším nahřátím/nachlazením výplňového materiálu regeneračního výměníku. Zařazením MIZ typu „žárotrubný kotel“ a „regenerátor“ je počítáno s 9% úsporou paliva, čímž dochází ke zvýšení členu CRZ pro žárotrubný kotel:

$$CRZ_{ZK} = r \cdot h \cdot (10^{-6} \cdot (m_{SP} \cdot h_{SP} \cdot C_{SP} + m_{PP} \cdot h_{PP} \cdot C_{PP}) - (0.91 \cdot \dot{V}_{ZP} \cdot C_{ZP} + \dot{V}_{NV} \cdot C_{NP})). \quad (46)$$

Celkové investice jsou tvořeny pořizovací cenou za žárotrubný kotel a regenerátor.

$$C_{CIZK} = C_{ZK} + C_{REG}. \quad (47)$$

Přehled dosažených výsledků pro modifikaci „žárotrubný kotel“ je v tabulce 13.

Tabulka 13: Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „žárotrubný kotel“

Člen	CRZ	i_{min}	C_{CI}
Velikost	22 747 721 Kč	0.2	12 066 120 Kč
VP	20 334 497 Kč		

5.3.5 Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.3.2

Provedení žárotrubného kotle s přehřevem syté páry a předehřevem odplynu slučuje do jediné kompaktní jednotka všechna 4 potřebná zařízení. V plamencové komoře dochází ke zneškodňování odplynu, odpadní teplo vzniklých spalin je odebíráno ve druhé obrátové komoře a využíváno k výrobě přehřáté páry, je uvažováno, že její parametry se modifikací nezmění, tím pádem je zachován i stejný výkon. Na výstupu je umístěn předehřívák odplynu, který využívá zbytkové teplo odcházejících spalin. Touto modifikací je uvažována 7% úspora paliva, výpočet CRZ pak vypadá následovně:

$$CRZ_{ZK s\ predehrevem} = r \cdot h \cdot (10^{-6} \cdot (m_{SP} \cdot h_{SP} \cdot C_{SP} + m_{PP} \cdot h_{PP} \cdot C_{PP}) - (0.93 \cdot \dot{V}_{ZP} \cdot C_{ZP} + \dot{V}_{NV} \cdot C_{NP})). \quad (48)$$

Celkové investice jsou v případě žárotrubného kotle s přehřevem páry a předehřevem odplynu zastoupeny pouze tímto zařízením a člen C_{CI} má tvar:

$$C_{CI\ ZK s\ predehrevem} = C_{ZK s\ predehrevem}. \quad (49)$$

Vyčíslení všech členů VP a samotného VP pro žárotrubný kotel s přehřevem páry a předehřevem odplynu je v tabulce 14.

Tabulka 14: Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „kotel doplněný o předehřev odplynu“

Člen	CRZ	i_{min}	C_{CI}
Velikost	22 414 321 Kč	0.2	15 032 055 Kč
VP	19 407 910 Kč		

5.3.6 Venture Profit pro modifikaci jednotky dle kapitoly 4.4

Poslední řešenou modifikací je 30, kde je trubkový předehřívák odplynu nahrazen MIZ typu „regenerátor“. Využití této jednotky je vhodné právě v případě předehříváku odplynu, který je nejobjemnějším zařízením v celém procesu, regenerátory dosahují na stejném objemu podstatně větší plochy výměny tepla. U těchto typů výměníků je dosaženo vyšší tepelné účinnosti díky dosažení zlepšení využití tepelné energie spalin. S čímž je spojena úspora množství potřebného zemního plynu pro průběh procesu spalování, ve výpočtu CRZ je uvažováno s 6 % úsporou paliva pro toto řešení:

$$CRZ_{REG} = r \cdot h \cdot (10^{-6} \cdot (m_{SP} \cdot h_{SP} \cdot C_{SP} + m_{PP} \cdot h_{PP} \cdot C_{PP}) - (0.94 \cdot \dot{V}_{ZP} \cdot C_{ZP} + \dot{V}_{NV} \cdot C_{NP})). \quad (50)$$

Hodnota celkových investic je pro toto uspořádání složena ze spalovací komory, výparníku, přehříváku a MIZ typu „regenerátor“, jak ukazuje rovnice:

$$C_{CI\,REG} = C_{SK} + C_{VT_{vyp}} + C_{VT_{preh}} + C_{REG} \quad (51)$$

Výsledky pro modifikaci stávajícího procesu s využitím MIZ typu „regenerátor“ jsou shrnuty v tabulce 15.

Tabulka 15: Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „regenerátor“

Člen	CRZ	i_{min}	C_{CI}
Velikost	22 247 621 Kč	0.2	21 837 157 Kč
VP	17 880 189 Kč		

5.4 Zhodnocení a výběr nejvhodnější modifikace jednotky „waste-to-energy“

Nejvhodnější modifikace je vybrána na základě kritéria VP, které bylo stanoveno pro jednotlivé modifikace procesu představené v předcházejících kapitolách, výsledky pro všechna provedení jsou shrnuty v tabulce 16. Nejvyšší hodnota VP představuje největší předmětný roční rizikový zisk průmyslového provozu. Mezi zkoumanými variantami dosahuje nejvyšší hodnoty VP modifikace procesu s MIZ typu „žárotrubný kotel“, která činí 20 334 497 Kč/rok. U koncepce složené z žárotrubného kotle a regenerátoru je počítáno s největší úsporou zemního plynu, tj. 9 % oproti stávajícímu provedení, což vede ke snížení nákupní ceny surovin a následný nárůst čistého ročního zisku. Jedná se o optimální variantu z ekonomického pohledu, další výhodou je i menší zastavěná plocha oproti stávající provozované jednotce WtE a větší tepelná účinnost.

Tabulka 16: Venture Profit pro jednotlivé modifikace procesu

	VP	VP	VP
<i>Charakteristika provedení</i>	Stávající provozovaná jednotka WtE	Modifikace procesu MIZ typu „koaxiál“	Modifikace procesu MIZ typu „kotel na odpadní teplo“
<i>Kapitola</i>	kap.3	kap.4.1	kap.4.2
<i>Hodnota VP [Kč/rok]</i>	16 990 934	17 663 217	19 436 738
	VP	VP	VP
<i>Charakteristika provedení</i>	Modifikace procesu MIZ typu „žárotrubný kotel“	Modifikace procesu MIZ typu „žár. kotel s přehříváním“	Modifikace procesu MIZ typu „regenerátor“
<i>Kapitola</i>	kap. 4.3	kap.4.3.2	kap.4.4
<i>Hodnota VP [Kč/rok]</i>	20 334 497	19 407 910	17 880 189

Podle tabulky 16 je patrné, že druhou nejvýhodnější koncepcí pro průmyslový provoz je provedení podle kapitoly 4.2 s hodnotou VP 19 436 738 Kč/rok, které využívá koaxiální zařízení v kombinaci s kotlem na odpadní teplo. Tato koncepce je z ekonomického pohledu srovnatelná s o trochu méně výhodným provedením složeným pouze z žárotrubného kotle doplněného o přehřívák odplynu, rozdíl v kritériu VP mezi těmito dvěma modifikacemi procesu činí pouze 28 828 Kč/rok.

Zbývající koncepce mají zachovány jak výparník, tak i přehřívák páry a úpravy se týkají pouze spalovací komory a předehříváku odplynu. Zachováním těchto dvou trubkových výměníků beze změny dochází k nárůstu investiční nákladů, a tedy i členu C_{CI} , který snižuje výsledný VP . Nahrazením současně využívaného trubkového výměníku pro předehřev odplynu regeneračním typem s vyšší účinností dochází k úspoře paliva a i přes vyšší investiční náklady na toto zařízení je získána vyšší hodnota VP , číselně 17 880 189 Kč/rok, než u stávajícího procesu právě díky snížení nákupní ceny za zemní plyn. Modifikace procesu s využitím koaxiálního zařízení namísto spalovací komory a trubkového předehříváku odplynu představuje úsporu 9 % na investičních nákladech a 3% úsporu na spotřebě paliva. Získaný VP pak dosahuje hodnoty 17 663 217 Kč/rok. Nejméně výhodné zůstává stávající provedení kvůli velkému počtu zařízení a vysokým investičním nárokům na každý aparát, hodnota VP pro stávající uspořádání byla stanovena na 16 990 934 Kč/rok.

6 Závěr

Diplomová práce se soustřeďuje na problematiku termického zneškodňování plyných odpadů na konkrétním případě průmyslové jednotky „waste-to-energy“. Nejprve byla ukázána stávající skladba zařízení a jejich konstrukce, následně bylo využito těchto poznatků pro vyhodnocení možných úprav. Cílem bylo nalezení optimálních variant nasazení moderních integrovaných zařízení, která by funkčně nahrazovala stávající aparáty. Současně byly představeny rozdíly mezi základním a integrovaným řešením společně s výhodami, která tato zařízení přináší.

V rámci možných koncepcí vhodných pro využití ve zkoumané průmyslové jednotce bylo představeno 6 modifikací procesu s využitím MIZ, která jsou vyvíjena na Ústavu procesního inženýrství (koaxiální zařízení, regenerátor), nebo se objevují v zahraničních provozech (žárotrubný kotel se zařazeným přehřevem páry a předehřevem odplynu, spalovací ohříváč). Pro všechny aparáty ze stávající provozované jednotky a pro představená MIZ byly stanoveny korelační vztahy pro určení celkových nákladů na pořízení jednotlivých zařízení. Výpočetní rovnice byly odvozeny na základě cenových nabídek poskytnutých výrobcí zařízení.

O vhodném výběru typu zařízení je vždy rozhodováno z ekonomického pohledu, na základě návratnosti investice v co nejkratším časovém horizontu. Nejdůležitějším faktorem pro investory je pořizovací cena zařízení a celková ziskovost provozu. Z tohoto důvodu bylo v diplomové práci využito odborně uznávané technicko-ekonomické kritérium Venture Profit pro stanovení ziskovosti jednotlivých koncepčních návrhů.

Na základě Venture Profit byla vybrána nejvhodnější modifikace procesu, kterou je provedení s žárotrubným kotlem a regenerátorem sloužícím pro předehřev odplynu. S implementací MIZ jsou spojeny úspory paliva, tj. zemního plynu, pro potřeby průběhu spalování, čímž dochází ke snížení provozních nákladů a zvýšení zisků. Parametry výstupních produktů byly uvažovány pro všechny koncepce konstantní. Přibližně srovnatelné hodnoty VP pak dosahovaly modifikace procesu s využitím koaxiálního zařízení a kotle na odpadní teplo a modifikace s žárotrubným kotlem doplněným o přehřev páry i předehřev odplynu, která vyšla nepatrně hůře.

Zbývající koncepce se vyznačovaly větším počtem uvažovaných zařízení. Obecně lze tedy říci, že s přibývajícím počtem zařízení docházelo k poklesu hodnoty VP. Zde modifikaci procesu s regenerátorem následovala modifikace využívající koaxiální zařízení. U koaxiálního zařízení byla stanovena přibližně 10% úspora oproti separátnímu řešení spalovací komory a výměníku tepla určeného pro předehřev odplynu. Jako nejméně vhodné bylo vyhodnoceno stávající provedení kvůli velkému počtu zařízení, které zvyšují hodnotu celkových investic, a větší spotřebě paliva oproti modifikacím s MIZ.

Na závěr je také nutné zmínit, že využitím MIZ dochází ke zmenšení zastavěného prostoru. Redukcí množství spalovaného zemního plynu dochází k úspoře primárních zdrojů surovin a současně ke snížení produkce emisí a celkovému zlepšení dopadu výroby na životní prostředí.

Literatura

1. *Směrnice Evropského Parlamentu a Rady (EU) 2018/410*. 2018. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/410/oj>.
2. KLEMEŠ, Jiří Jaromír; VARBANOV, Petar Sabev; WALMSLEY, Timothy Gordon; FOLEY, Aoife. Process Integration and Circular Economy for Renewable and Sustainable Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, roč. 116, s. 109435 [cit. 2020-01-16]. ISSN 1364-0321. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rser.2019.109435.
3. JEGLA, Zdeněk; REPPICH, Marcus; KRŇÁVEK, Martin; HORSÁK, Jan. Key Areas of Engineering Mechanics in Design of Modern Integrated Process Equipment. In: Svratka, Czech republic, 0011–2020, sv. 26th International Conference.
4. JEGLA, Zdeněk. *Úvod do systémových přístupů pro procesy a energetiku - Rozvahy a optimalizace klíčového zařízení na počátku návrhu*. Přednáška předmětu KS3. Ústav procesního inženýrství, 2020.
5. KLEMEŠ, Jiri Jaromír; VARBANOV, Petar Sabev; WAN ALWI, Sharifah Rafidah Wan; MANAN, Zainuddin Abdul. *Process Integration and Intensification: Saving Energy, Water and Resources*. Walter De Gruyter, 2014. ISBN 978-3-11-036824-6.
6. STEHLIK, Petr. Heat Transfer as an Important Subject in Waste-to-Energy Systems. *Applied Thermal Engineering*. 2007, roč. 27, č. 10, s. 1658–1670. ISSN 1359-4311.
7. STEHLIK, Petr; STULIR, Roman; BEBAR, Ladislav; ORAL, Jaroslav. Alternative Arrangement of Unit for Thermal Processing of Wastes from Polluted Air. *Journal of Cleaner Production*. 2004, roč. 12, č. 2, s. 137–146. ISSN 0959-6526.
8. STULIR, Roman; STEHLÍK, Petr; ORAL, Jaroslav. Efficient Equipment with Special Heat Exchanger for Thermal Treatment of Polluted Air-Experiments, Computations, Applications. *Heat Transfer Engineering*. 2003, roč. 24, č. 6, s. 60–70. ISSN 0145-7632. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/714044415>.
9. BĚBAR, Ladislav. *Spalování fosilních paliv, Technologické linky zpracovatelského procesního průmyslu*. Přednáška předmětu KS2. Ústav procesního inženýrství., 2018–2019.
10. KILKOVSKÝ, Bohuslav. Review of Design and Modeling of Regenerative Heat Exchangers. *Energies* [online]. 2020, roč. 13, č. 3, s. 759 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z DOI: 10.3390/en13030759.
11. BRUMMER, Vladimír. *Zařízení pro zneškodňování odpadních plynů katalytickou oxidací*. Brno, 2007. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
12. DOLEŽAL, Lionel. *Nízkoenergetická katalytická oxidace kyslíkatých těkavých organických látek*. 2012–2015. Závěrečná zpráva o dosažených výsledcích za rok 2012–2015. ELVAC EKOTECHNIKA s.r.o.
13. FREISLEBEN, Vít. *Studie potenciálu integrovaného řešení jednotky „waste-to-energy“*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

14. SCHNELLE, Karl B.; DUNN, Russell F.; TERNES, Mary Ellen. *Air Pollution Control Technology Handbook, Second Edition*. Second edition. CRC Press Inc - M.U.A., 2015. ISBN 1-4822-4560-4.
15. STEHLÍK, Petr. Contribution to Advances in Waste-to-Energy Technologies. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2009, roč. 17, č. 10, s. 919–931 [cit. 2020-01-19]. ISSN 0959-6526. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.02.011.
16. 0620, ČSN 07. *Konstrukce a výstroj parních a horkovodních kotlů, čl. 413*. Úřad pro normalizaci a měření, 1978.
17. PAPAN, R. *Minimize Boiler Short Cycling Losses*. National Renewable Energy Laboratory (U.S.), 2000.
18. *Maple 2020*, dostupné také z: <https://www.maplesoft.com/>.
19. KAKAÇ, S. (Sadik); LIU, Hongtan; PRAMUANJAROENKIJ, Anchasa. *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4398-4990-3.
20. SHAH, Ramesh K. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003. ISBN 0-471-32171-0.
21. GANAPATHY, V. *Steam Generators and Waste Heat Boilers: For Process and Plant Engineers*. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4822-4712-1.
22. ASSOCIATION, Industrial Heating Equipment. *Combustion Technology Manual*. 5th edition. Arlington, Virginia: IHEA, 1994. ISBN 978-0-9620022-0-5.
23. JEGLA, Zdeněk. *Navrhování spalovacích procesních a energetických zařízení - I: Typy a provedení procesních pecí a kotlů*. Přednáška předmětu KNP. Ústav procesního inženýrství, 2019.
24. VIESMANN, climate of innovation. *Dampferzeuger Und Abhitzeessel*. 2015. Dostupné také z: <https://www.viessmann.cz/cs/prumysl/kotle-na-odpadni-teplo/vyroba-pary/vitomax-200rs.html>.
25. JEGLA, Zdeněk. *Navrhování spalovacích procesních a energetických zařízení - II: Koncepční návrh a řazení dílčích teplosměnných ploch, Navrhování procesních a energetických systémů*. Přednáška předmětu KNP. Ústav procesního inženýrství, 2019.
26. SCHNEIDER, Energy Systems GmbH. *SCHNEIDER-Three Pass Boilers, High Pressure Steam Generators in Single Flame-Tube Design* [online]. © 2019 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: https://www.schneider-kessel.com/products/hdo_hdod.html.
27. SOBBE, Wolfgang. *Steam and Hot Water Boiler Systems for Industrial and Municipal Power Generation*. In: Ho Chi Minh City: VKK Standardkessel Köthen GmbH, 2013.
28. KILKOVSKÝ, Bohuslav; JEGLA, Zdeněk. Preliminary Design and Analysis of Regenerative Heat Exchanger. In: *Chemical Engineering Transactions* 52. The Italian Association of Chemical Engineering, 2016, sv. 2016, s. 655–660. ISBN 978-88-95608-42-6. Dostupné z DOI: 10.3303/CET1652110.
29. HEATEC, INC. an Astec Industries Company. *Brochure - Helical Coil Heaters for Industrial Applications*. Chattanooga, USA, rev. 2011. Dostupné také z: http://www.heatec.com/literature/brochures/HCI%20bro%202011_loRes.pdf.

30. SEIDER, Warren D; LEWIN, Daniel R.; SEADER, J.D.; WIDAGDO, Soemantri; GANI, Rafiqul; NG, Ka Ming. *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation*. 4th edition. New York: John Wiley & Sons, 2017. ISBN 978-1-119-28263-1.
31. NOVOTNÝ, Ing Radek; CHROMEČ, Mudr. Michal. *Cena vody 2020 - vodné a stočné v 405 městech ČR a 76 městech SK* [online] [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://pravdaovode.cz/cena-vody/>.
32. CHEMICALOGIC, Corporation. *SteamTab™* [online]. Burlington, © 1999-2003 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://www.chemicallogic.com/Pages/SteamTabDownloads.html>.

Seznam tabulek

1	Charakteristické rozměry spalovací komory	13
2	Vliv přehřátí spalovacího vzduchu na úspory paliva pro danou teplotu [22]	21
3	Tepelné výkony	21
4	Provozní parametry a geometrické charakteristiky	22
5	Základní charakteristiky procesních proudů	22
6	Parametry zemního plynu a spalovacího vzduchu, charakteristické teploty	23
7	Parametry hlavního a vedlejšího odpadního plynu	38
8	Konstanty a a b z rovnice 35 charakterizující použitý typ materiálu [30] .	40
9	Průtoky parních proudů, zemního plynu a napájecí vody	43
10	Shrnutí VP pro stávající zkoumanou jednotku	44
11	Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „koaxiál“	45
12	Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „kotel na odpadní teplo“	45
13	Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „žárotrubný kotel“	46
14	Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „kotel doplněný o přehřev odplynu“	46
15	Shrnutí VP pro modifikaci s MIZ typu „regenerátor“	47
16	Venture Profit pro jednotlivé modifikace procesu	47

Seznam obrázků

1	Základní a integrované uspořádání procesu termického zneškodňování znečištěné vzdušiny	3
2	Příklad využití moderního integrovaného zařízení	3
3	Porovnání konvekčního a nového uspořádání	4
4	Experimentální zařízení [6]	5
5	Řez zařízením [7]	5
6	Proudění pracovních látek ve výměníku[8]	6
7	Struktura matematického modelu[6]	8
8	(a) Regenerátor pro ohřívání/ochlazování proudících médií, (b) regenerátor pro čištění spalin a odpadních plynů - možnost 1, (c) regenerátor pro čištění spalin a odpadních plynů - možnost 2 [10]	9
9	Poloprovozní jednotka s katalyzátorem vyvíjená na Ústavu procesního inženýrství [11]	9
10	Schéma části průmyslové jednotky „waste-to-energy“	10
11	Zjednodušený náčrt spalovací komory	12
12	Vzorový příklad	14
13	Zjednodušené schéma výparníku	18
14	Schéma přehříváku páry	19
15	Zjednodušený náčrt přehříváku	20
16	Přehřev odplynu ve zkoumané jednotce	20
17	Studovaná jednotka zneškodňování odpadního plynu se zaznačenými význačnými teplotami	22
18	T-Q diagram	23
19	Kompletní schéma jednotky termického zpracování plynných odpadů	24
20	Schéma modifikovaného procesu s MIZ typu „koaxiál“	25
21	Schéma modifikovaného procesu s kotlem na odpadní teplo	26
22	Schéma modifikovaného procesu s MIZ typu „žárotrubný kotel“ a MIZ typu „regenerátor“	27
23	Vizualizace provedení žárotrubného kotle s přehřevem páry [24]	27
24	Žárotrubný kotel doplněný o přehřev páry	28
25	Množství spalovacího vzduchu v závislosti na produkci CO a NO _x [21]	29
26	Recirkulace spalin v kotli	30
27	Žárotrubný kotel s maximalizací tvorby přehřáté páry	30
28	Schéma modifikovaného procesu s MIZ typu „žárotrubný kotel se zařazeným přehřevem páry a přehřevem odplynu“	31
29	Žárotrubný kotel s přehřevem páry a přehřevem odplynu [27]	31
30	Schéma modifikovaného procesu s regeneračním výměníkem pro přehřev odplynu	32
31	Regenerační výměník s pevným ložem	33
32	Modulární provedení kotle se šroubovicově stočenými trubkami	35
33	Závislosti velikosti korekčního faktoru F_L na délce trubek výměníku l	39
34	Grafy vývoje proměnných rovnice C_K	41

Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Význam	Jednotka
a	Konstanta charakterizující použitý typ materiálu trubek/pláště	[-]
A	Plocha výměny tepla	[m ²]
A_{PP1}	Průtočný průřez hrdla	[m ²]
A_{PP2}	Průtočný průřez spalovací komory	[m ²]
A_{pred}	Velikost plochy výměny tepla předehříváku odplynu	[m ²]
b	Konstanta charakterizující použitý typ materiálu trubek/pláště	[-]
B	Vzdálenost mezi dvěma sousedními kruhovými plechy	[m]
C_B	Základní cena trubkového výměníku s pevnými trubkovnicemi	[Kč]
C_{CI}	Hodnota celkových investic	[Kč]
$C_{CI\ koax}$	Hodnota celkových investic pro modifikaci s MIZ typu „koaxiál“	[Kč]
$C_{CI\ KOT}$	Hodnota celkových investic pro modifikaci s MIZ typu „kotel na odpadní teplo“	[Kč]
$C_{CI\ REG}$	Hodnota celkových investic pro modifikaci s MIZ typu „regenerátor“	[Kč]
$C_{CI\ SPJ}$	Hodnota celkových investic pro stávající provozovanou jednotku	[Kč]
$C_{CI\ ZK}$	Hodnota celkových investic pro modifikaci s MIZ typu „žárotrubný kotel“	[Kč]
$C_{CI\ ZK\ s\ predehrevem}$	Hodnota celkových investic pro modifikaci s MIZ typu „žárotrubný kotel doplněný o předehřívák odplynu“	[Kč]
C_K	Celkové investiční náklady na žárotrubný kotel	[mil.Kč]
C_{koax}	Investiční náklady na koaxiální zařízení	[Kč]
C_{KOT}	Investiční náklady na kotel na odpadní teplo	[mil.Kč]
C_{NV}	Cena napájecí vody	[Kč/m ³ _N]
\bar{c}_p	Střední měrná tepelná kapacita	[kJ/(kg · K)]
C_{PP}	Cena přehřáté páry	[Kč/GJ]
C_{REG}	Investiční náklady na regenerátor	[Kč]
C_{SK}	Investiční náklady na spalovací komoru	[Kč]
C_{SP}	Cena syté páry	[Kč/GJ]
C_{VT}	Investiční náklady na trubkový výměník	[Kč]
$C_{VT\ pred}$	Investiční náklady na předehřívák odplynu	[Kč]
$C_{VT\ preh}$	Investiční náklady na přehřívák páry	[Kč]
$C_{VT\ vyp}$	Investiční náklady na výparník	[Kč]
C_Z	Základní cena kotle	[mil.Kč]
C_{ZK}	Pořizovací cena za žárotrubný kotel	[mil. Kč]
$C_{ZK\ s\ predehrevem}$	Pořizovací cena za žárotrubný kotel doplněný o předehřívák odplynu	[mil. Kč]
C_{ZP}	Cena zemního plynu	[Kč/m ³ _N]

Symbol	Význam	Jednotka
CRZ	Čistý roční zisk	[Kč/rok]
CRZ_{koax}	Čistý roční zisk pro modifikaci s MIZ typu „koaxiál“	[Kč/rok]
CRZ_{KOT}	Čistý roční zisk pro modifikaci s MIZ typu „kotel na odpadní teplo“	[Kč/rok]
CRZ_{REG}	Čistý roční zisk pro modifikaci s MIZ typu „regenerátor“	[Kč/rok]
CRZ_{SPJ}	Čistý roční zisk stanovený pro stávající provozovanou jednotku	[Kč/rok]
CRZ_{ZK}	Čistý roční zisk pro modifikaci s MIZ typu „žárotrubný kotel“	[Kč/rok]
$CRZ_{ZK s\ predehrevem}$	Čistý roční zisk pro modifikaci s MIZ typu „žárotrubný kotel doplněný o předeřívák odplynu“	[Kč/rok]
D_1	Průměr hrdla	[m]
D_2	Průměr spalovací komory	[m]
F_L	Korekční faktor na délku trubek výměníku	[-]
F_M	Korekční faktor na typ použitého materiálu pro trubky/plášť výměníku	[-]
F_P	Korekční faktor na tlak v plášti u žárotrubného kotle	[-]
F_{PVT}	Korekční faktor zohledňují tlak v plášti výměníku	[-]
h	Počet provozních hodin za den	[h]
h_c	Vzdálenost mezi dvěma žebry	[m]
h_O	Entalpie opdpadního plynu	[kJ/kg]
h_{SP}	Entalpie spalin	[kJ/kg]
h_{VZ}	Entalpie spalovacího vzduchu	[kJ/kg]
h_{ZP}	Entalpie zemního plynu	[kJ/kg]
i_{min}	Minimální akceptovatelná návratnost investice	[rok ⁻¹]
k	Součinitel prostupu tepla	[W/(m ² · K)]
l	Délka spalovací komory	[m]
L	Délka trubek výměníku	[m]
LHV_{ZP}	Výhřevnost zemního plynu	[MJ/m ³]
\dot{m}	Hmotnostní průtok	[kg/h]
\dot{m}_O	Hmotnostní průtok odplynu	[kg/h]
\dot{m}_{PP}	Hmotnostní průtok přehřáté páry	[kg/h]
\dot{m}_{SP}	Hmotnostní průtok spalin	[kg/h]
\dot{m}_{VZ}	Hmotnostní průtok spalovacího vzduchu	[kg/h]
\dot{m}_{ZP}	Hmotnostní průtok zemního plynu	[kg/h]
MW	Molární hmotnost	[g/mol]
n	látkové množství	[mol]
n_{VZ}	počet molů vzduchu	[mol]
p	Tlak	[Pa]
Q	Výkon výměny tepla	[W]
Q_{ZT}	Ztráty tepla do okolí	[kW]
Q_{SP}	Teplo obsažené v syté páře o daných parametrech	[GJ/h]
Q_{PP}	Teplo obsažené v přehřáté páře o daných parametrech	[GJ/h]
r	Počet provozních dní průmyslové jednotky v roce	[den]
R	Univerzální plynová konstanta	[J/(mol · K)]
T	Teplota	[K]

Symbol	Význam	Jednotka
T_{CC}	Teplota na výstupu ze spalovací komory	[°C]
T_{DP}	Teplota rosného bodu spalin	[°C]
T_{ln}	Střední logaritmický teplotní rozdíl	[K]
T_{STACK}	Komínová teplota	[°C]
T_{TFT}	Adiabatická teplota spalování	[°C]
ΔT	Teplotní rozdíl	[K]
u_1	Rychlost v hrdle komory	[m/s]
u_2	Rychlost ve spalovací komoře	[m/s]
V	Objem	[m ³]
VP	Předmětný roční rizikový zisk	[Kč/rok]
\dot{V}	Objemový průtok	[m ³ /h]
\dot{V}_{NV}	Objemový průtok napájecí vody	[m ³ /h]
\dot{V}_O	Objemový průtok odpadního plynu	[m ³ /h]
\dot{V}_{SP}	Objemový průtok spalin	[m ³ /h]
\dot{V}_{ZP}	Objemový průtok zemního plynu	[m ³ /h]
x	Procentuální zastoupení složky	[-]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
ρ_{ZP}	Hustota zemního plynu	[kg/m ³]
ρ_{VZ}	Hustota spalovacího vzduchu	[kg/m ³]
τ	Zdržná doba	[s]

Zkratka	Význam
MIZ	Moderní integrované zařízení
VP	Venture Profit
WtE	„Waste-to-energy“

Seznam příloh

- Příloha 1: Samostatná příloha práce s názvem souboru:
„Koncepční návrh“
- Příloha 2: Samostatná příloha práce s názvem souboru:
„Investiční náklady + VP“