

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 544

ISSN 1213-4198



Ing. Pavel Št'asta

Využití čistírenských kalů jako alternativního paliva

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav procesního a ekologického inženýrství

Ing. Pavel Šťasta

**VYUŽITÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ JAKO
ALTERNATIVNÍHO PALIVA**

UTILIZATION OF SEWAGE SLUDGE AS ALTERNATIVE FUEL

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Oponenti: Prof. Ing. Josef Kohoutek, CSc.
Prof. Ing. Jiří Klemeš, CSc.
Ing. Miloslav Odstřčil, CSc.
Datum obhajoby: 18. 5. 2009

Klíčová slova

kal, termické zpracování, sušení, cementárna, optimalizace výměníku tepla

Keywords

sludge, thermal treatment, drying, cement works, heat exchanger optimization

Místo uložení práce

Ústav procesního a ekologického inženýrství

© Pavel Šťasta, 2009

ISBN 978-80-214-3932-0

ISSN 1213-4198

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ	5
1 ÚVOD.....	6
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
2.1.1 Spalování kalu v teplárnách, elektrárnách a spalovnách komunálního odpadu	7
2.1.2 Speciální spalovny odvodněného kalu	7
2.1.3 Spoluspalování kalu v cementárnách.....	8
3 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	9
4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	9
5 CEMENTÁRNA JAKO POTENCIÁLNÍ MÍSTO PRO SUŠENÍ KALŮ	11
6 TECHNOLOGIE SUŠENÍ KALŮ.....	11
6.1 Základní rozdělení sušáren kalů.....	11
6.2 Analýza vhodného typu sušení kalů.....	11
6.3 Průzkum trhu se sušárnami kalů v ČR a zahraničí, výběr konkrétní technologie sušení ..	12
7 OPTIMÁLNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU TEPLA PRO VYTÁPĚNÍ SUŠÁRNY	13
7.1 Trubkový výměník tepla se svazkem trubek - „Tube bundle type heat exchanger“	14
7.2 Určení fixních a variabilních nákladů	15
7.3 Rovnice celkových nákladů výměníku se svazkem trubek.....	17
7.4 Stanovení nezávislých proměnných.....	17
7.5 Určení optimální konfigurace výměníku	17
8 EKONOMICKÁ ANALÝZA	20
8.1 Hodnocení efektivnosti investice	20
8.2 Výsledky zhodnocení investice.....	20
8.2.1 Analýza parametrické citlivosti.....	22
9 ZÁVĚR.....	24
10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	25
STRUČNÝ ŽIVOTOPIS.....	26
ABSTRAKT	27
ABSTRACT	27

SEZNAM SYMBOLŮ

symbol	význam	jednotka
a	příčný (horizontální) poměr uspořádání trubek	m
a_f	anuitní faktor	rok ⁻¹
b	podélný (vertikální) poměr uspořádání trubek	m
b_K, c_K	koefficienty cenového trendu investičních nákladů zařízení (s indexem F pro ventilátor, P pro čerpadlo)	-
$d; d_i$	vnější, resp. vnitřní průměr trubky	m
c_O	rychlost oleje v trubkách	m.s ⁻¹
$c_{O,PR}$	rychlost oleje v propojovacím potrubí kolektorů	m.s ⁻¹
$cp_O; cp_{O,W}$	měrná tepelná kapacita oleje při stř. tepl. média; stěny trubky	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
cp_S	měrná tepelná kapacita spalin při střední teplotě	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
c_V	rychlost spalin ve volném průřezu výměníku	m.s ⁻¹
$C_{I,R}$	investiční náklady na rotač. stroje dopravující stlač. tekutiny	Kč
C_{KG}	kilogramová cena výměníku	Kč.kg ⁻¹
C_T	celkové náklady výměníku tepla	Kč.rok ⁻¹
k_i	ekvivalentní drsnost potrubí	m
k_E	cena elektrické energie	Kč.(Wh) ⁻¹
m_E	hmotnost výměníku	kg
$l_f; l_{tc}$	délka trubky; resp. celková délka trubky jednoho proudu	m
N_R	počet řad trubek	-
N_S	počet sekcí výměníku	-
q	parametr určující velikost nákladů na údržbu	-
$T_S; T_W$	střední teplota spalin, resp. stěny trubky ve stupních Kelvina	K
V	objemový průtok dopravované tekutiny	m ³ .s ⁻¹
$V_O; V_S$	objemový průtok oleje, resp. spalin	m ³ .s ⁻¹
$\alpha_O; \alpha_S$	součinitel přestupu tepla na straně oleje; resp. spalin	W.m ⁻² .K ⁻¹
$\lambda_O; \lambda_{O,W}$	tepelná vodivost oleje při stř. teplotě média, stěny trubky	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
λ_S	tepelná vodivost spalin při střední teplotě	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Δp	celková tlaková ztráta	Pa
$\Delta p_O; \Delta p_S$	tlaková ztráta oleje resp. spalin ve výměníku	Pa
$\Delta p_{O,C}$	celková tlaková ztráta oleje v olejovém okruhu	Pa
$\Delta p_{S,C}$	celková tlaková ztráta spalin	Pa
$\eta_{CF}; \eta_{CP}$	celková účinnost soustrojí ventilátoru, resp. čerpadla	-
$\eta_O; \eta_S$	dynamická viskozita oleje, resp. spalin	Pa.s
$\eta_{O,W}; \eta_{S,W}$	dynamická viskozita oleje; spalin při stř. teplotě stěny trubky	Pa.s
$\rho_O; \rho_S$	hustota oleje; hustota spalin	kg.m ⁻³
τ_B	roční doba provozu (fond pracovní doby)	h.rok ⁻¹
ξ	součinitel tlakové ztráty	-
$\xi_{O,T}$	součinitel místního odporu trubkového hadu	-
$\xi_{O,PR}$	součinitel místního odporu propojení kolektorů	-

1 ÚVOD

Významným problémem dnešní společnosti je nakládání s odpady. Jejich množství se v rozvíjejících se zemích neustále zvyšuje. Do této oblasti spadá také často problematický, koncový produkt čištění odpadních vod (ČOV), kal. V kalu bývá obsaženo 50 až 80 % původního znečištění odpadní vody [1]. Zastoupeny jsou často nežádoucí látky, jako jsou těžké kovy, patogenní látky, nemoci způsobující mikroorganismy, apod.

Náklady na zpracování kalu z ČOV nejsou malé, v jednotlivých ČOV jsou proměnné (záleží na způsobu konečného zpracování), běžně se však pohybují okolo ½ provozních nákladů. Při pohledu na legislativou uzákoněný postup nakládání s kalem, jakožto odpadem dle předpisů EU i ČR můžeme konstatovat následující:

1. Zamezit vzniku odpadů - u kalu nelze (lze pouze redukovat množství)
2. Využít odpad materiálově = zejména využití v zemědělství
3. Využít energetický obsah odpadu = spalování a spoluspalování kalů
4. Odpad odstranit (zneškodnit) = skládkování kalů

Specifický způsob zpracování kalu, který efektivně přispívá k problému se spalováním fosilních paliv i nakládání s odpady, nabízí tzv. „spolu-spalování“ (co-firing) kalu v cementárenských pecích. Spalovaný kal, jakožto obnovitelný a poměrně dostupný zdroj energie, na který je ve velké míře pohlíženo pouze jako na odpad, zde nahrazuje neobnovitelné fosilní paliva (uhlí či zemní plyn). Jedná se tedy o energetické využití jeho obsahu. Zároveň je popel zpracován do slinku a kal je využit i materiálově.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Hlavní způsoby zpracování často problematického výstupu ČOV – kalů je možné rozdělit do dvou skupin na nedestruktivní a termické. Mezi nedestruktivní metody patří zejména přímé použití na zemědělskou půdu, kompostování, ukládání na skládky či rekultivace.

Přesto, že je v současné době v ČR zpracována termickým způsobem pouze malá část kalů, lze předpokládat, že v blízké budoucnosti se tento podíl zvýší. Na základě studia nakládání s kaly můžeme jako hlavní důvody pro termické zpracování kalů jmenovat následující:

- Nesplnění podmínek pro použití v zemědělství (obsah těžkých kovů a patogenních mikroorganismů, podmínky použití), nižší poptávka od zemědělců
- Trend zvyšování poplatků za ukládání na skládky
- Povinnosti uložené legislativou:
 - postupné snižování množství biodegradabilních odpadů ukládaných na skládky (implementace směrnice EU 99/31/EC)

- povinnost vybudovat v obcích s více jak 2000 ekvivalentními obyvateli dvoustupňovou, mechanicko-biologickou ČOV (implementace směrnice EU 91/71/EEC). Z tohoto důvodu lze předpokládat nárůst množství čištěných odpadních vod a tím i množství produkováných kalů.

Dále jsou popsány nejčastější metody používané při termickém zpracování kalů.

2.1.1 Spalování kalu v teplárnách, elektrárnách a spalovnách komunálního odpadu

Výhodou této metody je bezesporu nízká investiční náročnost [2] (=investice do zařízení pro meziuložení, přepravu a dávkování kalu do kotle). Kal postačuje odvodnit v čistírně na obsah sušiny cca 25 % a není již potřeba v místě termického zpracování budovat zařízení pro jeho odvodnění, sušení či granulování. Kal se přidává do uhlí před mletím. Množství takto přidaného odvodněného kalu se obvykle pohybuje od cca 1 do max. 5 % [3]. Problém může nastat při vysokém obsahu rtuti, dále také může dojít k zhoršení kvality popílku či energosádrovce [4] (při použití vápencové vypírky).

Obdobným způsobem jako v případě tepláren a elektráren lze v některých případech zpracovávat kal i v spalovnách komunálního odpadu, výhodou je existující, většinou moderní systém čištění spalin.

2.1.2 Speciální spalovny odvodněného kalu

Dominantní postavení v přímém spalování kalu představují fluidní a etážové pece [5], jsou však používány i jiné typy např. rotační, cyklónové a různé typy slinovacích pecí.

Nejčastější typ spalování kalů ve fluidní peci má řadu pozitiv [5] jako je velmi dobré promíchání kalu a písku s vytvořením velké plochy povrchu, dostatečná doba zdržení kalu pro vyhoření, volný objem komory (nad fluidním ložem) sloužící jako dohořivací komora s kompletní destrukcí organických látek, stabilita spalovacího procesu –zásoba horkého materiálu inertního lože působí jako setrvačnický zabráňující náhlým změnám teploty (např. při změnách ve složení kalu). Dále dochází k prakticky dokonalému spalování při poměrně nízkých teplotách a přebytku vzduchu.

Přes všechny uvedené klady této technologie je důležité upozornit na to, že při 20 až 30% obsahu sušiny v kalu ještě není zaručeno autarkní spalování a může tedy nastat potřeba použití přídavného paliva a vzhledem k tomu, že kal obsahuje nebezpečné látky jako těžké kovy, dioxiny a furany, které se při spalování uvolňují v různých formách, a také z důvodů dodržení stále se zpřísňujících emisních limitů, je nutný poměrně rozsáhlý (investičně náročný) a účinný systém čištění spalin, včetně dioxinového filtru (např. moderní systém „Remedia“ na bázi katalytické filtrace). S odpady vzniklými při čištění spalin a s popelem, ve kterém jsou též nebezpečné látky zastoupeny, je tedy nutné nakládat odpovídajícím způsobem.

2.1.3 Spoluspalování kalu v cementárnách

Ze zkušeností se jeví „spolu-spalování“ kalů v rotačních pecích cementáren jako ekologicky nejvhodnější technologií [6] termického zpracování kalů. Tento způsob zpracování může být výhodným především z těchto důvodů:

- Vysoká spalovací teplota (teplota plamene 1700 – 2200°C), stabilita procesu, dostatečná doba prodlevy a oxidační atmosféra jsou zárukou dokonalého rozkladu organických látek (včetně PCDD/F a PCB).
- Měřené emisní limity při experimentech v ČR byly v souladu s platnou legislativou (např. emise těžkých kovů a tuhých znečišťujících látek dokonce o jeden až dva řády nižší než emisní limit, emise PCDD/PCDF o řád nižší).
- V součtu ze samostatného spalování a spoluspalování kalu v cementárně dochází ke snížení produkce CO₂. S takto uspořenými emisemi je pak možné obchodovat.
- Dochází k úspoře fosilních paliv (uhlí, zemní plyn, petrokoks, mazut) obnovitelnými zdroji. Energetický obsah kalů může být využit s vysokou účinností. Jedna tuna sušených kalů nahradí cca 1/3 t uhlí nebo 1/5 t mazutu (při experimentech v ČR se uvádí úspora 261 kg/h mazutu spálením 1 t sušených kalů). Dalším faktem je, že kal jakožto odpad nepodléhá spotřební dani, což se pozitivně promítá i do ceny výrobku (cementu) [7].
- Jednoduchá aplikace do pece - vysušený kal (cca 90 % sušiny) je možné smíchat s černým uhlím a spalovat v hlavním hořáku rotační pece.
- Jedná se o bezodpadovou technologii, při které zároveň dochází k částečné úspoře suroviny pro výpal slinku díky obdobnému složení popele kalu [8]. Podle kvality, může 1 tuna sušených kalů nahradit až 1/3 tuny vstupní suroviny.
- Většina těžkých kovů a větší část škodlivin (S, Cl, alkálie) je v technologii výpalu cementářského slinku zachycena. Vyluhovací zkoušky produktu ukázaly jejich zafixování v silikátových mřížkách. Výluhy odpovídají dokonce limitům stanoveným pro pitnou vodu (potvrzeno zkušenostmi v zahraničí a několika experimenty v ČR: Radotín, Čížkovice, Mokrá).
- Mezi nejproblematictější látky patří těkavé prvky, jako je rtuť a thalium. Průběhu odpařování rtuti z kalu je podrobně věnována práce [9]. Ze sledování obsahu rtuti v cementárně vyplývá [10], že rtuť ve formě chloridů se v rotační peci z velké části odpařuje, prochází systémem přehřevu suroviny a následně z velké části (měření ukazují min. 90 %) kondenzuje na velmi jemných prachových částicích (sloužících jako kondenzační jádra) v chladnější části procesu, na vstupu do odlučovačů prachových částic. Tato větší část rtuti je tedy obsažena v odprašcích. Podobně se chovají další těkavé látky jako jsou Tl, Cd, Be. Odprašky (nebo jejich část), je pak možno jednoduchým opatřením odvádět ze systému. Jak zdroj dále uvádí, pokud by se odprašky odváděly od počátku spalování kalů, neměl by být problém s přidáváním do cementu. Byly provedeny výluhy z cementu, z nichž vyplývá, že pokud bude cement obsahovat maximálně

3 % hmotnostní odprašků, nedojde ke zhoršení vlastností cementu, jak prokázaly i fyzikálně mechanické zkoušky. Výluhy z cementu (a eventuálních betonových výrobků) by měly splňovat limity pro jakost pitné vody.

Pokud se týká zpracování kalů v cementárně, zatím ve známých případech je kal sušen přímo v ČOV a do cementáren se vozí již sušený. Tento fakt předpokládá existenci sušárny kalu přímo na čistírnách odpadních vod. Pro menší čistírny ČR by ve většině případů byla investice do provozu linky ekonomicky nemožná, v úvahu připadá instalace sušáren kalu ve větších čistírnách a svoz z okolních menších. I v tomto případě však představuje investice, ale zejména provoz sušárny pro ČOV poměrně vysoké náklady.

V České republice již běží projekt sušení kalu za účelem jeho spalování v cementárně. Kal je zde však za nemalých provozních nákladů vysušen spalováním primárního paliva - zemního plynu, přímo v ČOV. Produkce kalu, odvodněného na cca 30 % sušiny, je cca 100 t/ den (v práci se uvažuje se zpracováním téměř stejného množství kalů). Uvážíme-li cenu zemního plynu 900 Kč/MWh, účinnost kotle 90 %, ostatní ztráty tepla 3 %, pak pro sušení na obsah sušiny 90 % - vhodný pro spoluspalování (~ odparu 66,7 t H₂O/ den), vychází náklady ~18,5 mil Kč/ rok.

3 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této disertační práce je kromě seznámení s používanými způsoby zpracování kalů, s poukázáním na pravděpodobné trendy odpovídající negativním vlivům na životní prostředí, především prověření myšlenky specifického způsobu nakládání s kaly, totiž sušení odvodněných čistírenských kalů za využití odpadního tepla cementárny přímo v provozu cementárny, s jejich následným spoluspalením v rotační peci pro výpal slínku. Uvažovaný projekt počítá s dopravou mechanicky odvodněných kalů z okolních čistíren, z okruhu asi 50 km od cementárny.

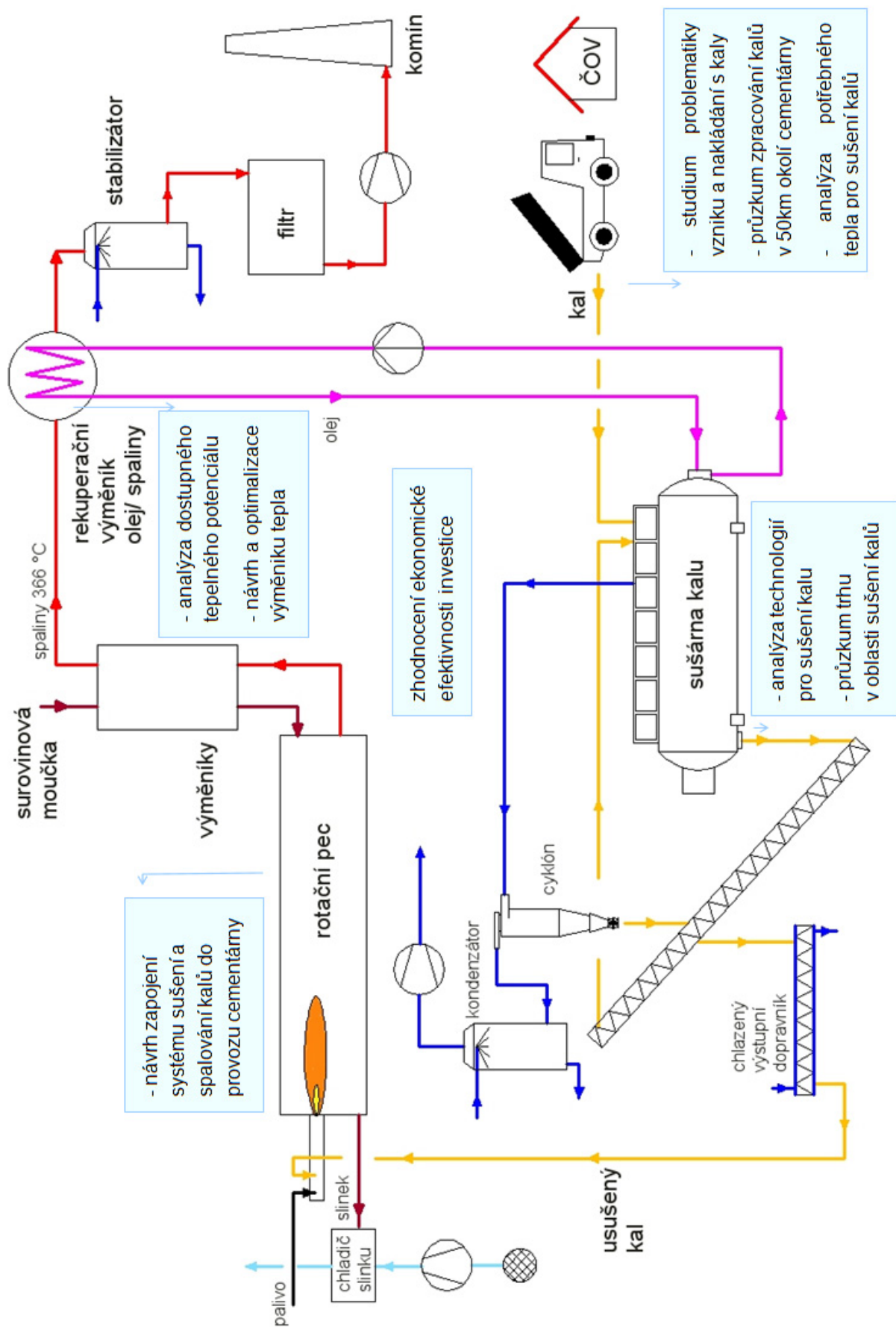
Práce se věnuje zejména prověření technických možností realizovatelnosti s následným návrhem vlastního řešení a ekonomickým zhodnocením této ideje. Práci je tedy možné přirovnat k tzv. studii proveditelnosti (Feasibility Study) tohoto specifického způsobu zpracování kalů.

4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Zvolené metody zpracování a obsah disertační práce jsou nejlépe patrné z následujícího obr. 1.

Po zpracování dat z ČOV v 50 km okolí provozu cementárny byla provedena analýza potřebného a dostupného tepla provozu a navržen doposud nepoužívaný způsob využití nadbytečného tepla spalin pro sušení s následným spalováním kalů.

Byl proveden průzkum trhu a analýza několika technologií v oblasti sušení kalů, pro vybranou technologii pak navržena realizace vytápění sušárny optimalizovaným „U“ trubkovým svazkovým výměníkem. Na závěr byla vypracována ekonomická analýza, zahrnující celkové náklady projektu, s posouzením ekonomické efektivity.



Obr. 1 Obsah a řešené oblasti dizertační práce

5 CEMENTÁRNA JAKO POTENCIÁLNÍ MÍSTO PRO SUŠENÍ KALŮ

Cementárna je místo, kde za vysokých teplot dochází při tzv. kalcinaci k přeměně vápence a korekčních složek na slínek a oxid uhličitý. Proces je značně energeticky náročný, měrná spotřeba energie se může pohybovat okolo 3,4 GJ/ t vyrobeného slínku. Množství spalin je tedy, i při snaze provozu spalovacího procesu s nízkým přebytkem vzduchu, značné. Nejen z těchto důvodů disponují často cementárny potenciálem pro odběr tepla, který je s výhodou možné využít např. pro sušení kalů.

Na základě průzkumu v 50km okolí s nakládání s kaly a měření linky výpalu slínku byla provedena analýza potřebného a dostupného tepelného potenciálu, ze které vyplynulo, že dostupný tepelný potenciál je pro sušení kalů ze zmíněného okolí dostatečný.

V technologii výpalu slínku je možné uvažovat o více místech s tepelným potenciálem, který přichází v úvahu pro sušení kalů. Jedním z nich je místo chlazení slínku na roštovém chladiči, kde dochází ke chlazení slínku proudícím vzduchem. Vzduch po ochlazení slínku má poměrně velký tepelný potenciál, je však značně zaprášený prachovými částicemi slínku a tudíž silně abrazivní. Mezi dalšími můžeme zmínit větve spalin jdoucí do stabilizátorů a je-li, pak i halogenový by-pass. Pro odebrání tepla za účelem sušení kalů bylo vybráno místo před stabilizátory.

6 TECHNOLOGIE SUŠENÍ KALŮ

Výběr vhodné a ekonomicky přijatelné technologie sušení kalů hraje jednu z klíčových rolí realizovatelnosti navrhovaného postupu zpracování kalů. Z tohoto důvodu byla tomuto problému věnována nemalá pozornost.

6.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ SUŠÁREN KALŮ

Sušárny kalů je obecně možné rozdělit do tří hlavních skupin podle toho, jakým způsobem dochází k přenosu tepla na přímo či nepřímo vyhřívané a kombinované, kde dochází ke styku sušícího a sušeného média (kalu) obojím způsobem - přímým i nepřímým (přes stěnu) kontaktem.

6.2 ANALÝZA VHODNÉHO TYPU SUŠENÍ KALŮ

U přímých a kombinovaných sušáren dochází ke kontaktu mezi sušeným a sušícím médiem, kalem. Protože při sušení kalů může docházet k částečnému odpařování těžkých kovů jako rtuť, kadmium a tedy ke znečištění sušícího média s následnou nutností čištění sušícího média smíchaného s brýdovými parami, byly pro uvažovanou aplikaci poptávány sušárny nepřímo vyhřívané, u kterých nedochází ke styku mezi kalem a sušícím médiem, a je tedy zabráněno možnosti kontaminace sušícího média. Jako sušící médium u nepřímo vyhřívaných sušáren slouží pára či teplotonosný olej. Protože využití páry jako topného média je spojené s vyššími technologickými nároky (potřeba úpravy vody, nakládání s kondenzátem)

i investičními náklady (vyššími tlaky v potrubí = vyšší tloušťky potrubí, ...) bylo uvažováno s teplotnosným olejem jako sušicím médiem.

6.3 PRŮZKUM TRHU SE SUŠÁRNAMI KALŮ V ČR A ZAHRANIČÍ, VÝBĚR KONKRÉTNÍ TECHNOLOGIE SUŠENÍ

Technologie sušení kalu	Teplota oleje [°C]	Výstupní sušina [%]	Instalov./ provozní příkon [kW]	Odpařovací výkon [kg H ₂ O/h]	Rozměry dxšxv [m]/ hmotnost [kg]	Cena [mil. €]
Fluidní sušení CDS 50 - Andritz	230÷250	92	308/ 182	4630	16,5x11,4x17,2 /	3,49
Disková sušárna Atlas Stord	180÷200	90	160/	4447	13,4x3,1x3,6 /	1,02
Pásová sušárna Dry Rex	200 (vzduch)	95	100	4673	12x7x6,5 / 10000	0,9
Lopátková sušárna GMF-Gouda	225÷250	>95	200÷25	4500	14,5÷16,4x4x4 / 90000÷100000	1,89 ÷ 2,17
Tenkovrstvá a lineární suš. Limus	175÷200	92	448/ 365	4446	/ 132500	2,02
Etážová sušárna Seghers		>90	/ 160	2780	~15x13,5x19 /	1,6
Tenkovrstvá, vysoko-otáčková sušárna Vomm	240÷280	90	520/ 380	4600	13x6x2,5 / 84000	3,27

Tab. 1 Srovnání hlavních parametrů technologií pro sušení kalu

Kromě ceny za různorodé technologie jsou významné rozdíly např. ve spotřebě energií (pohybuje se v poměrně velkém rozmezí cca 100 až 380 kW), ale také rozsahu dodávky. Zajímavé může být též přihlédnutí k zastavěné ploše a také výšce, která se opět dle technologie mění a pohybuje se cca od 3,5 m skoro až do 20 m.

Zejména po zohlednění výše uvedených důvodů byla pro sušení kalů termoolejem vybrána technologie s rotační diskovou sušárnou firmy Atlas Stord, se kterou je pro další úvahy počítáno.

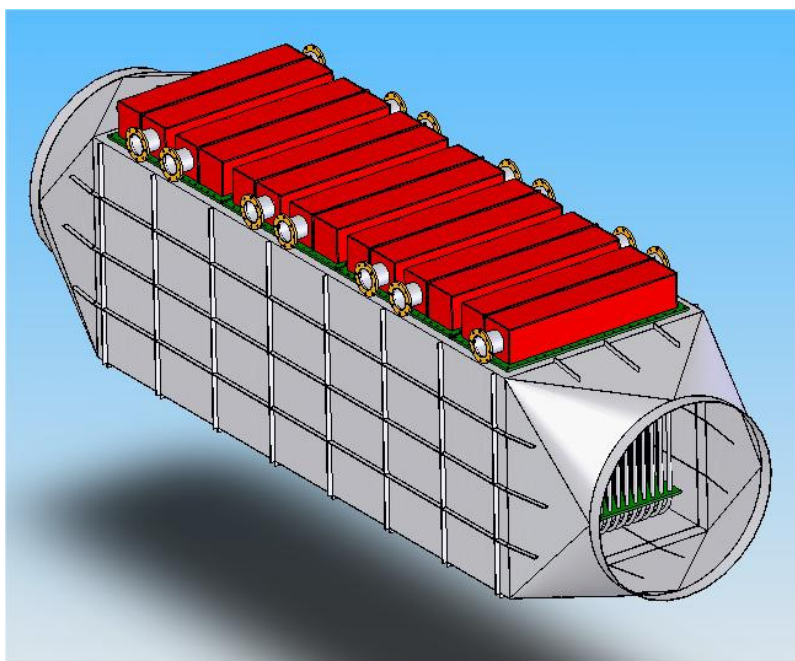
7 OPTIMÁLNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU TEPLA PRO VYTÁPĚNÍ SUŠÁRNY

S technickým, ale také ekonomickým prověřením projektu, je bezpodmínečně spojena snaha minimalizovat náklady celého systému. Jednou z důležitých součástí tohoto systému je výměník získávající teplo ze spalin za účelem vytápění sušárny.

Po volbě typu výměníku tepla, byla provedena optimalizace navrženého typu (viz obr. 2) výměníku tepla. Pro efektivní vyhodnocení je nutné, aby optimalizace zahrnovala nejen počáteční investiční náklady, ale také náklady provozní, které mají na výsledném ekonomickém efektu nemalý podíl. Celkové náklady výměníku je tedy možné principiálně rozdělit na dvě hlavní části – investiční a provozní náklady. Přesněji jsou to náklady fixní a variabilní, neboť k investičním nákladům, které tvoří hlavní položku nákladů fixních, je nutné připočítat také náklady na údržbu.

Mezi hlavní parametry ovlivňující investiční náklady výměníku tepla můžeme zařadit plochu výměny tepla, která je závislá na intenzitě přestupu tepla, především pak na součinitelích přestupů tepla na straně spalin i oleje. Hlavním parametrem ovlivňujícím provozní náklady je tlaková ztráta, opět jak na straně spalin, tak oleje. Platí, že se zvyšující se rychlostí proudícího média dochází ke zvyšování součinitele přestupu tepla a tím ke zmenšování potřebné plochy výměny tepla, zároveň však se zvyšující se rychlostí média dochází ke zvyšování tlakových ztrát, a tedy k nárůstu provozních nákladů.

Cílem tedy je nalezení optima, v našem případě minima, celkových nákladů. Tento postup optimalizace celkových nákladů vychází z principů aplikovaných na deskových výměnících, uvedených v práci [11].



Obr. 2 Výměník tepla se svazky „U“-trubek a sériově propojenými sekcemi

7.1 TRUBKOVÝ VÝMĚNÍK TEPLA SE SVAZKEM TRUBEK - „TUBE BUNDLE TYPE HEAT EXCHANGER“

Abychom tedy mohli provést optimalizaci celkových ročních nákladů, je třeba popsat základní vztahy pro přestup tepla a výpočet tlakových ztrát tohoto typu výměníku. Existuje více metod výpočtu (dle různých autorů) tlakových ztrát a přestupu tepla plynného média proudícího přes svazek trubek, popsaných např. v [12], [13], [14]. Ve většině těchto metod je však nutné dosazovat doplňující koeficienty odečtením z grafů. V našem případě byl vybrán jediný nalezený, zcela analytický, výpočtový model popsaný v [15], ve kterém se zmíněný jev ručního odečítání pomocných koeficientů z grafů (pro zautomatizovanou optimalizaci jev nevýhodný), nevyskytuje.

S využitím vztahů uvedených v tomto zmíněném zdroji a další literatuře pak byly pro tento typ výměníku postupně odvozeny vztahy pro výpočet tlakových ztrát a součinitelů přestupu tepla spalin i oleje, jak je ukazují následující rovnice:

$$\Delta p_s = \xi \cdot N_R \cdot \frac{\rho_s \cdot \left(\frac{a}{(a-1)} \cdot c_v \right)^2}{2}, \quad (7-1)$$

$$\begin{aligned} \text{kde} \quad \xi = & \frac{280 \cdot \pi \cdot \left[(b^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75 \right] \cdot (a-1) \cdot \eta_s \cdot \left(\frac{\eta_{s,W}}{\eta_s} \right)^{\left\{ \frac{0,57}{\left[\left(\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi} \right)^{-1} \right]^{0,25}} \right\}}}{(4 \cdot a \cdot b - \pi) \cdot a^{2,6} \cdot c_v \cdot d \cdot \rho_s} + \\ & + \left\{ \frac{2,5 + \left(\frac{1,2}{(a-0,85)^{1,08}} \right) + 0,4 \cdot \left(\frac{b}{a} - 1 \right)^3 - 0,01 \cdot \left(\frac{a}{b} - 1 \right)^3}{\left(\frac{a}{(a-1) \cdot \eta_s} \cdot c_v \cdot d \cdot \rho_s \right)^{0,25}} \right\} \cdot \left(\frac{\eta_{s,W}}{\eta_s} \right)^{0,14} \cdot \\ & \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{\frac{a}{(a-1) \cdot \eta_s} \cdot c_v \cdot d \cdot \rho_s + 200}{1000} \right) \right] \end{aligned} \quad (7-2)$$

$$\Delta p_o = N_s \cdot \frac{\rho_o}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{1,42}{\left(\log \frac{c_o \cdot d_i^2 \cdot \rho_o}{k_i \cdot \eta_o} \right)^2 \cdot d_i} \cdot l_{ic} + (\Sigma \xi_{o,T}) \right) \cdot c_o^2 + (\Sigma \xi_{o,PR}) \cdot c_{o,PR}^2 \right\} \quad (7-3)$$

$$\alpha_s = \left(1 + \frac{2}{3 \cdot b}\right) \cdot \left[0,3 + \sqrt{\left(0,664 \cdot \sqrt{\frac{c_v \cdot \frac{\pi}{2} \cdot d \cdot \rho_s}{\left(1 - \frac{\pi}{4 \cdot a}\right) \cdot \eta_s}} \cdot \sqrt[3]{\frac{c_{p,s} \cdot \eta_s}{\lambda_s}}\right)^2} + \right. \\ \left. + \frac{\left(0,037 \cdot \frac{c_v \cdot \frac{\pi}{2} \cdot d \cdot \rho_s}{\left(1 - \frac{\pi}{4 \cdot a}\right) \cdot \eta_s}\right)^{0,8} \cdot \frac{c_{p,s} \cdot \eta_s}{\lambda_s}}{1 + 2,443 \cdot \left(\frac{c_v \cdot \frac{\pi}{2} \cdot d \cdot \rho_s}{\left(1 - \frac{\pi}{4 \cdot a}\right) \cdot \eta_s}\right)^{-0,1} \cdot \left(\left(\frac{c_{p,s} \cdot \eta_s}{\lambda_s}\right)^{2/3} - 1\right)} \right] \cdot \left(\frac{T_s}{T_w}\right)^{0,26} \frac{2 \cdot \lambda_s}{\pi \cdot d} \quad (7-4)$$

$$\alpha_o = \frac{\left(1,82 \cdot \log_{10}\left(\frac{c_o \cdot d_i \cdot \rho_o}{\eta_o}\right) - 1,64\right)^{-2} \cdot \left(\frac{c_o \cdot d_i \cdot \rho_o}{\eta_o} - 1000\right)}{8 + 101,6 \cdot \sqrt{\left(1,82 \cdot \log_{10}\left(\frac{c_o \cdot d_i \cdot \rho_o}{\eta_o}\right) - 1,64\right)^{-2}} / 8 \cdot \left(\left(\frac{c_{p,o} \cdot \eta_o}{\lambda_o}\right)^{2/3} - 1\right)} \cdot \\ \left[1 + \left(\frac{d_i}{l_t}\right)^{2/3}\right] \cdot \frac{(c_{p,o} \cdot \eta_o)^{1,11} \cdot \lambda_{o,w}^{0,11}}{(\lambda_o \cdot c_{p,o,w} \cdot \eta_{o,w})^{0,11} \cdot d_i} \quad (7-5)$$

V práci byla též zohledněna problematika rovnoměrného rozdělení toku oleje v trubkách teplosměnné plochy výměníku. Vztahy použité v optimalizaci pro výpočet termofyzikálních vlastností spalín byly srovnány s výsledky programu ChemCad 6.1.2. Odchylka od tohoto programu byla poměrně nízká, max. cca 2,5 %.

7.2 URČENÍ FIXNÍCH A VARIABILNÍCH NÁKLADŮ

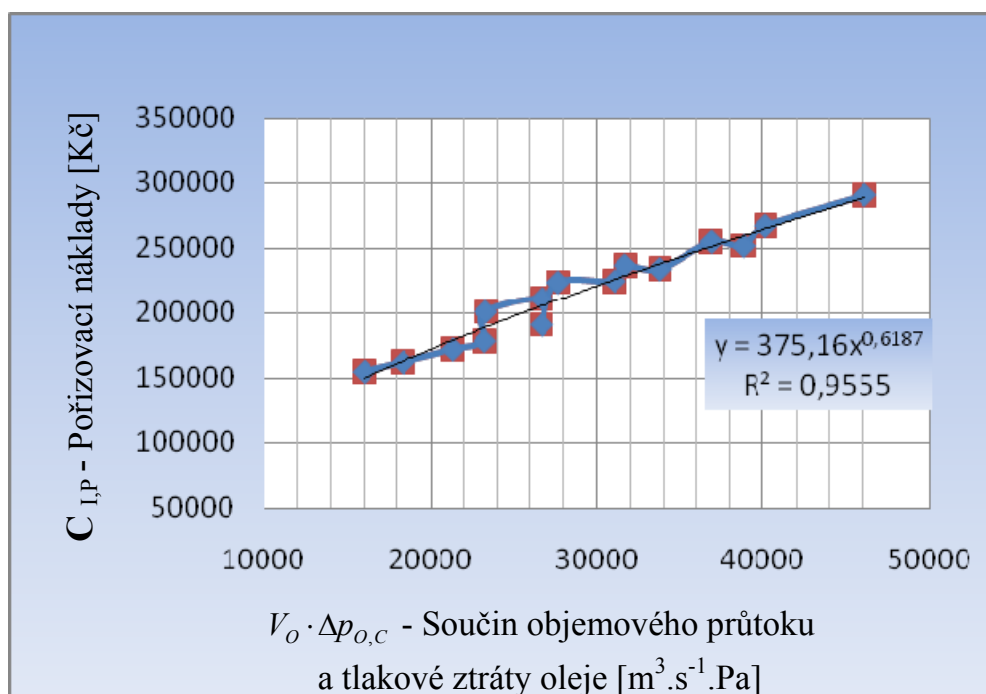
Celkové náklady můžeme vyjádřit jako součet fixních a variabilních nákladů. Aby bylo možné tyto položky sčítat, je nutné, aby byly vyjádřeny ve stejných jednotkách. Fixní náklady, zastoupené především jednorázovými investičními náklady je tedy potřeba převést na roční hodnotu. Pro tento účel bylo použito metody anuit, předpokládající, že se po dobu ekonomické životnosti zařízení bude investice včetně úroků splácet ročními splátkami či amortizačními náklady.

Mezi hlavní položky fixních nákladů patří, kromě nákladů na údržbu, investiční náklady na zařízení. V našem případě jsou tyto náklady tvořeny investičními náklady na výměník, olejová čerpadla a investičními náklady na ventilátor.

Pro investiční náklady na rotační stroje (čerpadla a ventilátor) byl použit vztah [11]:

$$C_{I,R} = b_K \cdot (V \cdot \Delta p)^{c_K}, \quad (7-6)$$

Koeficienty b_K a c_K zohledňují cenový trend investičních nákladů pro dané zařízení. Pro ventilátor byly tyto nalezeny v [11], v případě čerpadel byly koeficienty stanoveny pro cirkulační olejová čerpadla KSB (včetně motoru, s rotační mechanickou ucpávkou) na základě cenové poptávky. Pro tyto zmíněné čerpadla pak byly nalezeny následující hodnoty: $b_{K,P} = 375,16$ a $c_{K,P} = 0,6187$, viz též sestavený následující graf 1. Tento graf je též možné, v daném rozsahu, obecně použít při předběžném určování pořizovacích nákladů na zmíněná olejová čerpadla při znalosti žádaného tlakového spádu (dopravní výšky) a objemového průtoku oleje čerpadla.



Graf 1 Pořizovací náklady na olejové čerpadlo

Do variabilních nákladů spadají především náklady provozní. Mezi ty nejdůležitější můžeme z hlediska optimalizace systému přehřevu oleje ve výměníku spaliny/olej považovat zejména zvýšené náklady na provoz ventilátoru spalin a náklady na provoz cirkulačního čerpadla oleje.

7.3 ROVNICE CELKOVÝCH NÁKLADŮ VÝMĚNÍKU SE SVAZKEM TRUBEK

Po určení rovnic vyjadřujících celkové fixní a variabilní náklady byla pro celkové náklady sestavena rovnice ve tvaru:

$$C_T = a_f \cdot \left(m_E \cdot C_{KG} + b_{K,P} \cdot (V_O \cdot \Delta p_{O,C})^{C_{K,P}} + b_{K,F} \cdot (V_S \cdot \Delta p_{S,C})^{C_{K,F}} \right) \cdot (1+q) + k_E \cdot \tau_B \cdot \left(\frac{V_O \cdot \Delta p_O}{\eta_{C,P}} + \frac{V_S \cdot \Delta p_S}{\eta_{C,F}} \right) \quad (7-7)$$

7.4 STANOVENÍ NEZÁVISLÝCH PROMĚNNÝCH

Analýzou výše uvedené rovnice pro celkové roční náklady byly nalezeny čtyři nezávislé parametry, které jsou shrnuty v následující tab. 2 s rozdělením k příslušným fixním, resp. variabilním nákladům.

DRUH NÁKLADŮ	TLAKOVÁ ZTRÁTA/ SOUČINITEL	PARAMETR
FIXNÍ	součinitel přestupu tepla spalin - α_S	d, a, n_{tr}
	součinitel přestupu tepla oleje - α_O	d, a, n_{tr} , r
VARIABILNÍ	tlaková ztráta spalin ve vým. - Δp_S	d, a, n_{tr}
	tlaková ztráta oleje ve vým. - Δp_O	d, a, n_{tr} , r

Tab. 2 Výsledné, nezávislé optimalizační parametry

7.5 URČENÍ OPTIMÁLNÍ KONFIGURACE VÝMĚNÍKU

Z výsledků předchozí kapitoly, uvedených v souhrnné tab. 2, vyplývá, že návržení optimální konfigurace výměníku můžeme převést na hledání takových hodnot d, a, n_{tr} , r (vnějšího průměru trubky, příčného poměru uspořádání, počtu trubek v řadě a počtu řad jednoho chodu), při kterých jsou celkové náklady nejnižší.

Definice optimalizační úlohy

V našem případě se jedná o nelineární optimalizaci se čtyřmi (viz tab. 2) proměnnými. Účelová funkce vychází z rovnice (7-7) a zejména z důvodu rozsáhlosti, není přímo vyjádřena v závislosti na zmíněných nezávislých parametrech. Kromě závislosti na parametrech, které můžeme určit výpočetně či jiným způsobem (termofyzikální vlastnosti, teplota spalin na výstupu, diskontní sazba,...) můžeme pro účelovou funkci (celkové náklady výměníku) psát:

$$C_T = f(d, a, n_{tr}, r) \quad (7-8)$$

Pro řešení optimalizační úlohy byly uvažovány následující omezující podmínky:

- $d \in \langle 27, 114 \rangle \text{ mm}$ - Vnější průměr d byl volený podle standardní řady rozměrové normy trubek ANSI B36.10, tloušťka stěny t , průměru odpovídající, standardní.
- $a \in \langle 1,5; 3 \rangle$ - příčný poměr uspořádání volen v oblasti jeho platnosti.
- $l_t = d \cdot a \cdot (n_{tr} + 0,5) \leq 2,3 \text{ m}$ - Počet trubek byl volen s ohledem na velikost průtočného průřezu výměníku, max. rozměr čtvercové strany výměníku byl po konzultacích ohraničen jako 2,3 m.
- $r \in \langle 1, 3 \rangle$ - počet řad jednoho chodu volen s ohledem na max. rozměr $x=y=l_t$.
- $c_o \in \langle 1, 4 \rangle$ - Mezi omezující prvky je též třeba zmínit ohraničující fakt návrhu, že rychlost oleje v trubkách, by se měla, dle inženýrské praxe, pohybovat mezi cca 1 až 4 m/ s.
- $\Delta p_s \leq 1050 \text{ Pa}$ - instalovaný ventilátor má využitelnou rezervu na tlaku cca 1000 Pa. Tato hodnota s tolerancí +5 % byla též stanovena jako omezující podmínka, kterou je však možné „porušit“ při uvažování pořizovacích nákladů na ventilátor v rovnici celkových nákladů.

Pro účely minimalizace je běžné sestavit účelovou funkci, pro kterou následně matematickými operacemi hledáme její extrém (nejčastěji minimum). Tuto účelovou funkci je i v našem případě možné sestavit. Tato funkce však není spojitá, ale mění se skokově. To je dáno zejména nezávislými parametry n_{tr} , r (počtu trubek v řadě a počtu řad jednoho chodu), které jsou násobky celých čísel, jsou tedy nespojitě, a mění se skokově, podobně je tomu u průměru d . Dalším faktem způsobujícím skokové změny ve výsledných hodnotách celkových ročních nákladů je, že celkový počet proudů musí být násobkem počtu trubek v řadě a počtu řad jednoho chodu. Je to proto, že průtočné množství oleje, pro přenesení požadovaného tepla při teplotním gradientu 20 °C, je poměrně velké a není možné umístit všechny proudy oleje do jedné řady trubek, pokud chceme zachovat reálné rozměry výměníku. Proto není možné s použitím běžných optimalizačních postupů (hledání extrémů funkcí s využitím derivací) najít minimum této funkce.

Z výše uvedených důvodů byla provedena optimalizace metodou tzv. dichotomického hledání, která spočívá v postupném systematickém dosazování hodnot nezávislých parametrů a porovnání vypočtených celkových nákladů (tj. hodnoty účelové funkce) s dosud nejmenší nalezenou hodnotou. Tato metoda bývá též nazývána metodou úplné enumerace (úplného vyčíslení) účelové funkce.

Aplikací metody dichotomického hledání s ohledem na uvedená omezení byla s využitím matematického softwaru MathCad 14 nalezena optimální konfigurace a parametry výměníku, jak uvádí následující tab. 3 a tab. 4.

PARAMETR	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
vnější průměr	d	33,4	mm
příčný poměr	a	2,7	-
počet řad jednoho chodu	r	3	-
počet trubek v řadě	n_{tr}	24	-

Tab. 3 Nalezená optimální konfigurace nezávislých proměnných

PARAMETR	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
rychlost oleje v trubkách	c_O	1,971	m/ s
rychlost spalin ve volném průřezu	c_V	11,23	m/ s
rychlost spalin v nejužším průřezu	c_N	17,83	m/ s
součinitel přestupu tepla na straně spalin	α_S	127,6	W/ m ² .K
součinitel přestupu tepla na straně oleje	α_O	2157	W/ m ² .K
součinitel prostupu tepla	k	117,7	W/ m ² .K
tlaková ztráta spalin	Δp_S	1,022	kPa
tlaková ztráta oleje	Δp_O	71,09	kPa
plocha výměny tepla	A	202,1	m ²
počet sekcí	N_S	6	-
rozměry volného průřezu, délka trubek	x, l_t	2,21	m
délka výměníku	l_V	~3,5	m
hmotnost výměníku	m_E	8504	kg
pořizovací náklady na výměník	$C_{I,E}$	2 551	tis. Kč
pořizovací náklady na čerpadla oleje	$C_{I,P}$	300,6	tis. Kč
náklady na údržbu	C_M	85,548	tis. Kč
provozní (variabilní) náklady	C_V	1 965	tis. Kč/ rok
celkové náklady	C_T	2 211	tis. Kč/ rok

Tab. 4 Další charakteristické veličiny nalezené optimální konfigurace výměníku

Mezi zajímavé poznatky řešené optimalizace patří, že konfigurace se třemi řadami jednoho chodu výměníku ($r=3$) je z hlediska celkových nákladů (pro stejné d, n_{tr} , a) příznivější než konfigurace pouze se dvěma chody ($r=2$). Je tomu tak i přes to, že plocha a tedy i pořizovací náklady na výměník jsou v prvním zmíněném případě vyšší (díky sníženému přestupu tepla na straně oleje). Tento fakt je způsoben nižšími náklady provozními (variabilními), zásluhou většího počtu proudů oleje. Jak se ukázalo, tyto náklady mají v tomto případě ve výsledném efektu větší váhu, než nárůst fixních nákladů, díky vyšší pořizovací ceně výměníku.

8 EKONOMICKÁ ANALÝZA

Úvaha využití odpadního tepla cementárny pro sušení čistírenských je kromě prověření dopadů na proces výpalu slinku, celkový provoz cementárny, prostředí a technické realizovatelnosti nezbytně spojená s otázkou, zda je tato myšlenka též ekonomicky přínosná, jak se předpokládá.

Abychom dosáhli reálného obrazu o výsledném posouzení efektivity investice, byla za tímto účelem vyvinuta velká snaha určit náklady spojené s realizací tohoto projektu pokud možno s velkou přesností. Investiční náklady projektu pro strojní část i ostatní položky byly stanoveny na základě odborných konzultací, poptávek u specializovaných firem, materiálů dostupných na internetových stránkách a literatuře.

Dále byly určeny provozní náklady, resp. úspory při spalování vysušených čistírenských kalů, vycházející zejména z nákladů na palivo, elektrickou energii (spojené se zavedením této technologie) a úspor za surovinovou moučku.

8.1 HODNOCENÍ EFEKTIVNOSTI INVESTICE

Při rozhodování o realizaci investičních záměrů se většinou řídíme několika z řady kritérií, které nás informují o předpokládaném průběhu toků peněz, návratnosti, ziscích (úsporách) nebo výnosnosti investice, a tím ukazují na ekonomickou efektivitu investice.

Metody hodnocení investic můžeme obecně rozdělit na statické (nepřihlíží k působení faktoru času) a dynamické (přihlíží k působení faktoru času) [16], [17].

Abychom získali bližší představu o efektivnosti vložené investice, byly jako hlavní kritéria použity dynamické metody - diskontovaná doba návratnosti, čistá současná hodnota a vnitřní výnosové procento.

8.2 VÝSLEDKY ZHODNOCENÍ INVESTICE

Pro investiční náklady bez uvažování nákladů na stavební část (sušárna s olejovým okruhem umístěny v prostorách cementárny) a další parametry provozu, popsané v disertační práci, vycházejí kritéria pro rozhodování o efektivnosti investice způsobem zachyceným v následující tab. 5.

Parametr	Jednotka	PROJEKTANT	INVESTOR
Investiční náklady	[mil. Kč]	58,34	58,34
Diskontní míra	[%]	2,2	2,2
Diskontovaná doba návratnosti	[rok]	4,4	5,4
Čistá současná hodnota	[mil. Kč]	119,8	88,7
Vnitřní výnosové procento	[%]	20,4	15,7

Tab. 5 Výsledky kritérií ekonomického hodnocení bez stavebních nákladů

Pro příklad uveďme, vliv výběru jiné technologie sušení (investičních nákladů), např. v případě etážové sušárny o stejných parametrech by se doba návratnosti (z pohledu investora) pohybovala okolo cca až 9 let.

Při využití kalů jako alternativního paliva dochází také ke snížení množství emisí CO₂ vzniklých při spalování fosilních paliv. Při využití celého potenciálu suchého kalu z okolních čistíren cementárny cca 8,7 kt/ rok dochází k úspoře černého uhlí cca 3,5 kt/ rok. Uvážíme-li, že spálením 1 tuny černého uhlí s výhřevností 26,45 MJ/ kg vzniká cca 2,47 t CO₂, dojde k celkovému snížení emisí CO₂ cementárny o cca 8,8 kt CO₂/ rok. S těmito uspořenými emisemi je možné dle Kjótského protokolu [18] obchodovat. Prodejní cena pro dané množství se dle [19] pohybuje okolo 3 €/ t CO₂, roční úspora by tedy činila 26 400 €/ rok, cca 800 tis. Kč/rok, dle jiného zdroje [20] se situace na trhu rychle mění a hodnota se vyhoupla i na 29 €/ t CO₂ a úspory by tedy byly téměř desetinásobné.

Zahrneme-li nižší potenciální zisk z prodeje emisí, sníží se doba návratnosti o 0,3 roku, tedy na 5,1 roku, vnitřní výnosové procento se zvýší na 16,9 % a čistá současná hodnota se zvýší na 96,3 mil. Kč.

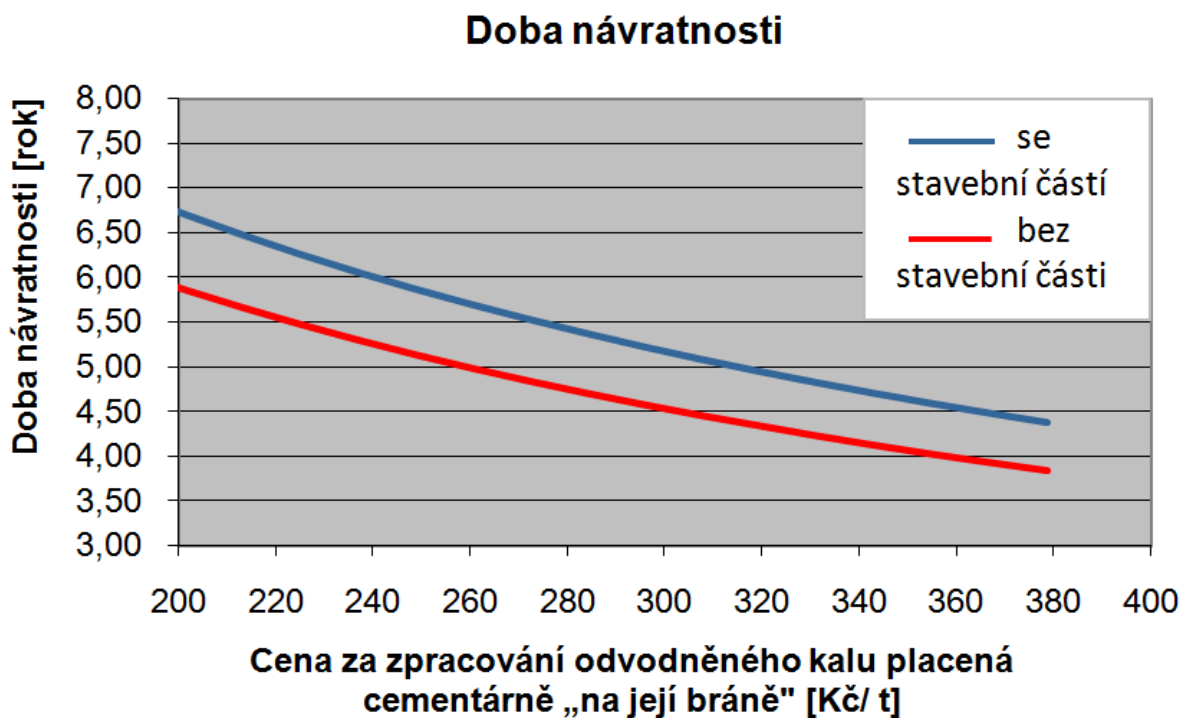
Pokud by byla nutná stavba budovy pro strojní zařízení technologie sušárny a olejového okruhu, vychází hodnoty kritérií rozhodování (bez uvážení úspor z prodeje emisí) uvedené v následující tab. 6.

Parametr	Jednotka	PROJEKTANT	INVESTOR
Investiční náklady	[mil. Kč]	66,85	66,85
Diskontní míra	[%]	2,2	2,2
Diskontovaná doba návratnosti	[rok]	5,1	6,2
Čistá současná hodnota	[mil. Kč]	110,4	81,2
Vnitřní výnosové procento	[%]	16,9	13,0

Tab. 6 Výsledky kritérií ekonomického hodnocení s uvážením stavebních nákladů

Jak uvádí [21], úlohou ekonomické analýzy není jen vyčíslení hodnot kritérií ekonomické efektivnosti, ale také (nebo zejména) nalezení tzv. minimální ceny produkce, kterou bychom měli považovat za minimální hodnotu, s níž bude pro nás jako pro investora projekt ještě ekonomicky zajímavý.

V našem případě můžeme za pojem „minimální cena produkce“ dosadit minimální cenu placenou cementárně např. „na bráně cementárny“, za kterou by byla cementárna ochotna odvodněný kal zneškodňovat. Uvedenou závislost ceny kalu na bráně cementárny v závislosti na době návratnosti, z pohledu investora, zachycuje následující graf 2.



Graf 2 Doba návratnosti v závislosti na ceně za zpracování odvodněného kalu

Z tohoto grafu může cementárna, jakožto potenciální investor, pro zvolenou max. dobu návratnosti investice určit cenu placenou za likvidaci odvodněného kalu na její bráně.

Ekonomicky příznivější varianta však je domluvit ceny vždy s jednotlivými ČOV v závislosti na jejich současných výdajích za zbavení se kalu. Je to proto, že pro vzdálenější ČOV již tato cena nemusí být zajímavá.

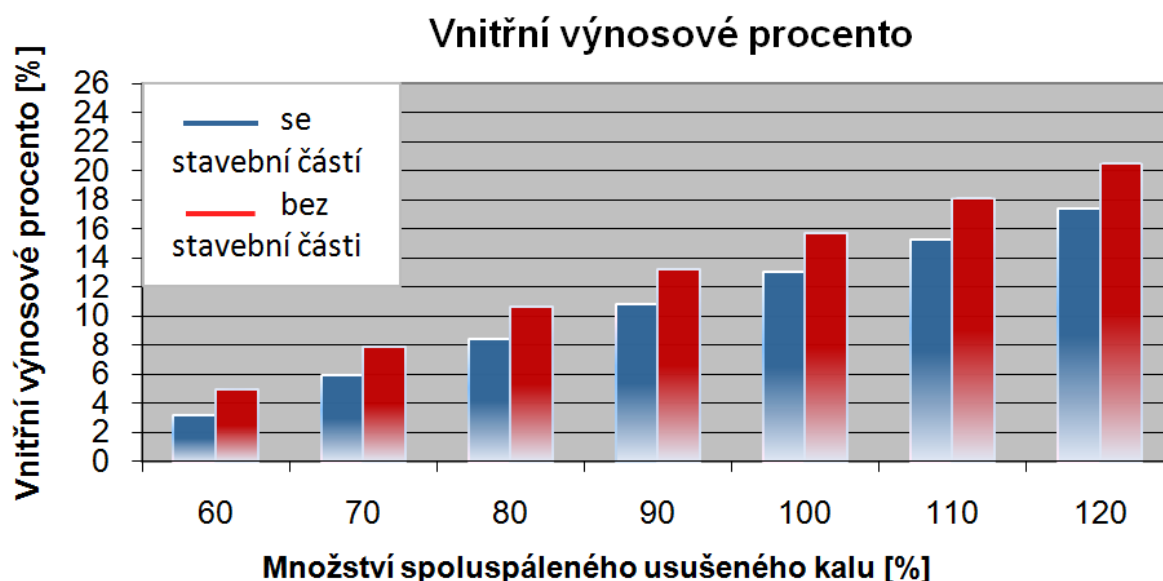
8.2.1 Analýza parametrické citlivosti

Výše uvedené výsledky ekonomického zhodnocení investice jsou závislé na mnoha parametrech, které je ovlivňují. Za účelem stanovit „rizika“ či rizikové body projektu se provádí citlivostní analýza, která zahrnuje právě zachycení vlivu jednotlivých proměnných parametrů na výsledné ekonomické zhodnocení. Tyto závislosti se vynášejí do grafů, ze kterých je možné každou změnu rychle identifikovat [22]. Přínosem této analýzy je možnost rychle reagovat na jakoukoli změnu v návrhu.

Mezi hlavní faktory ovlivňující efektivnost investice patří:

1. Náklady na dopravu kalů
2. Zisk z likvidace kalů
3. Cena elektrické energie
4. Množství kalů
5. Obsah sušiny v kalu

Pokud se podíváme blíže např. na bod 4 - množství kalů, jakým způsobem změna množství, za předpokladu zachované ceny kalu, ovlivní vnitřní výnosové procento ukazuje následující graf 3.



Graf 3 Vnitřní výnosové procento v závislosti na množství spoluspáleného kalu

Mezi dalšími parametry, ovlivňujícími výsledné zhodnocení můžeme např. jmenovat výhřevnost kalu, sazbu daně, prodej uspořených emisí a diskontní míru.

Nejpříznivější x nejméně příznivá kombinace

Výše uvedené faktory jsou na sobě nezávislé nebo jen částečně závislé a jejich vlivy na výsledné ekonomické zhodnocení se tedy mohou sčítat, resp. kompenzovat. Abychom měli představu, jaký může být nejpříznivější či nejméně příznivý souhrn těchto vlivů, jsou tyto hodnoty uvedeny v následující tab. 7. Mezi ovlivňující parametry byly zahrnuty faktory pod body 1, 3, možnost (resp. nemožnost) prodeje uspořených emisí, a umístění sušárny v prostorách cementárny.

Parametr	Jednotka	Příznivý vývoj		Nepříznivý vývoj
		Emise 29 €/ t CO ₂	Emise 3 €/ t CO ₂	
Diskontovaná doba návratnosti	[rok]	3,1	4,2	8,3
Čistá současná hodnota	[mil. Kč]	195,9	126,7	46,1
Vnitřní výnosové procento	[%]	31,0	21,3	7,9

Tab. 7 Příznivý a nepříznivý vývoj ekonomického zhodnocení

9 ZÁVĚR

Z pohledu nakládání s kaly v ČR a zahraničí je možné konstatovat rostoucí význam termického zpracování kalů. Ze způsobů zpracování kalů, popsaných v této práci, se jeví spoluspalování kalů z ČOV v cementářských pecích jako ekologicky nejvýhodnější řešení. Je nutné zejména znovu upozornit, že jde o bezodpadovou technologii a kal lze též považovat za obnovitelný zdroj energie. Jistým záporem pro ekologii se jeví nutnost dopravy odvodněných kalů do cementárny, je však nutné si uvědomit, že i v případě ostatních způsobů zpracování kalů se kaly ve většině případů musí na dané místo dopravovat a v porovnání se současným stavem nakládání s kaly pozitiva jednoznačně převažují.

Z ekonomické analýzy vyplývá, že spalování čistírenských kalů v cementárně při využití nadbytečného tepla z procesu výpalu slínku, může být ekonomicky přínosné, jak pro cementárnu, tak pro ČOV. Na jednotlivá kritéria pro hodnocení ekonomie provozu má však vliv řada faktorů. Ty nejdůležitější jsou popsány v analýze parametrické citlivosti.

V poslední řadě by se na tento problém ekologického zneškodňování kalů mohlo též pohlížet jako na zájem společnosti (jako na tzv. společenskou objednávku), na který by státem či z fondů EU mohly být poskytnuty odpovídající dotace.

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Dohányos M., *Strategie nakládání s čistírenskými kaly*, Odpadové fórum, 2004, roč. 5, č. 5, s. 8 – 11
- [2] Hartig K., *Fluidní spalování kalů*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003
- [3] Hartig K., *Současná a blízká budoucnost v spalování kalů z čistíren odpadních vod*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003
- [4] Divecká H., Valentová Z., *Ovlivnění provozních nákladů spoluspalování kalů jeho dopravou do teplárny/ elektrárny*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003
- [5] Wherter J., Ogada T., *Sewage Sludge Combustion*, Progress in Energy and Combustion Science, 1999, vol. 25, pp. 55 – 116
- [6] Kůra O., Schneiderová J., Vávra J., *Připravovaná termická likvidace čistírenských kalů z ČOV Brno*, Sovak, 2000, č. 11, s. 16 – 17
- [7] Veverka Z., *Alternativní paliva v cementárnách*, Odpadové fórum, 2004, roč. 5, č. 10, s. 8 – 11
- [8] Gemrich J., Schlattauer P., Táborský T., *Spalování čistírenských kalů v cementárně*, Odpadové fórum, 2001, roč. 4, č. 1, s. 12 – 13
- [9] Sponar J., *Možnosti využití odpadů z úpraven a čistíren vod v silikátových technologiích*, Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Brno, 2002
- [10] Kutil J., Prospěch L., *Spoluspalování čistírenských kalů v elektrárně a cementárně*, Konference kaly a odpady 2004, Ústav vedecko-technických informací pre pôdohospodárstvo Nitra, 2004
- [11] Jegla Z., *Integrace pecí do procesů za účelem redukce spotřeby energie*, Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno 1999
- [12] Perry R. H., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 1997
- [13] Hewitt G. F., (coordinating editor), *Process heat transfer*, CRC Press, 1994
- [14] G.F. Hewitt (executive editor), *HEDH - Heat Exchanger Design Handbook*, Beggel House Inc., New York, 1998
- [15] VereinDeutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1984
- [16] Kordíková Z., *Metody hodnocení investičních variant*, [cit. 2008], Článek dostupný na stránkách: st.vse.cz/~XHORV11/PE301/investice.doc

- [17] Hašek J., *Metody hodnocení investic*, [cit. 2008], Článek dostupný na stránkách: <http://www.icm.uh.cz/soubor.py/FIL5092>
- [18] *Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu*, OSN 1998, [cit. 2005], dostupný na stránkách: <http://www.chmi.cz/cc/kyoto.html>
- [19] Firma Eurobaterý, Soukromé sdělení, únor 2005
- [20] Holas V., Holcim (Česko) a.s., Soukromé sdělení, Brno, 2007
- [21] Knápek J., Vašíček J., *Hodnocení ekonomické efektivnosti projektů využívajících obnovitelné zdroje energie*. In Obnovitelné zdroje energie pro venkov i teplárenství, Parexpo, s. 85-93, Pardubice, 2004
- [22] Martinák P., Stehlík P. (autor i řešitel), *Problematika externích energetických zdrojů a kogenerace*, Výzkumná zpráva VZ-313-362/04 pro řešení projektu OK 313 a OK 362, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Brno 1998

STRUČNÝ ŽIVOTOPIS

I N G . P A V E L Š Ť A S T A

OSOBNÍ INFORMACE

- Rodinný stav: ženatý
- Národnost: česká
- Věk: 29 let
- Místo narození: Brno

VZDĚLÁNÍ

- | | |
|-------------|--|
| 2005 - 2009 | Chempex – HTE a.s., projektant |
| 2002 - 2005 | VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav
procesního a ekologického inženýrství

Postgraduální studium v oboru Konstrukční a procesní
inženýrství |
| 1997 - 2002 | VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav
procesního a ekologického inženýrství

Magisterské studium v oboru Konstrukční a procesní
inženýrství |
| 1990 - 1997 | Gymnázium Tábořská, Brno
Sedmileté studium, obor všeobecný |

JAZYKY

Anglický jazyk: pokročilý
Německý jazyk: středně pokročilý
Francouzský a ruský jazyk: mírně pokročilý

PRÁCE S PC

AutoCad; SolidWorks (3D); ChemCad, Mathcad (částečně); Paint Shop; MS Office; Adobe Acrobat

OSTATNÍ AKTIVITY

Therm-Centrum – vědeckovýzkumné pracoviště v rámci doktorského studia

ČLENSTVÍ V PROFESNÍCH ORGANIZACÍCH

Studentské členství v rámci doktorského presenč. studia:
– Asociace čistírenských expertů ČR (AČE – ČR)
– Česká společnost chemického inženýrství

ABSTRAKT

Disertační práce pojednává o způsobech zpracování čistírenských kalů, se zaměřením na možnost využití kalů jako alternativního paliva v cementárně. Navrhované řešení předpokládá sušení kalů za využití nadbytečného tepla tohoto provozu. Pozornost je věnována dopadům na životní prostředí a možnostem sušení kalů. Pro konkrétní provoz cementárny je navržena technologie zpracování kalů, zahrnující optimální návrh způsobu odebrání tepla spalinám prostřednictvím „U“-trubkového svazkového výměníku. Na závěr je provedeno zhodnocení ekonomického přínosu tohoto řešení.

ABSTRACT

Dissertation thesis deals with methods of sewage sludge treatment, with focus on possibility of sludge usage as alternative fuel in cement works. Proposed solution supposed sludge drying with using of excess heat of this plant. Attention is paid to impacts on environment and possibilities of sludge drying. For real cement factory is designed technology of sludge treatment, involving optimized manner of heat recovery of flue gases by „U“-tube bundle heat exchanger. Finally follows evaluation of economic benefit of this solution.