VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

VYUŽITÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ JAKO ALTERNATIVNÍHO PALIVA

UTILIZATION OF SEWAGE SLUDGE AS ALTERNATIVE FUEL

DISERTAČNÍ PRÁCE
DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Ing. PAVEL ŠŤASTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Prof. Ing. PETR STEHLÍK, CSc.

BRNO 2009

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.

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

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

ŠŤASTA, P. *Využití čistírenských kalů jako alternativního paliva*. Brno, 2009. 147 s. Disertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a že použité literární prameny jsem uvedl v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 25. 2. 2009

.....

Ing. Pavel Šťasta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému školiteli Prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc., za jeho odborné vedení v doktorandském studiu, ostatním pracovníkům ústavu Procesního a ekologického inženýrství za konzultace a odbornou podporu, děkuji také pracovníkům cementárny Prachovice, firmy Eveco Brno, s.r.o., své rodině a všem, kteří mě jakýmkoliv způsobem podpořili při vytváření této práce.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ 7

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK 13

1 ÚVOD 14

1.1 TÉMATICKÉ ZAMĚŘENÍ PRÁCE 14
1.2 ZPRACOVÁNÍ KALŮ Z ČÍSTÍREN ODPADNÍCH VOD 16

2 KAL Z *ČOV* 18

2.1 VZNIK, DRUHY A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KALU Z *ČOV* 18
2.2 SITUACE KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ V ČR A VYBRANÝCH EVROPSKÝCH ZEMÍCH . 20

3 ZPRACOVÁNÍ KALŮ 22

3.1 NEDESTRUKTIVNÍ ZPŮSOBY ZPRACOVÁNÍ KALŮ 22
3.1.1 Využití kalů v zemědělství 22
3.1.2 Ukládání kalu na skládky, rekultivace 24
3.2 TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ KALŮ 25
3.2.1 Hlavní důvody pro termické zpracování kalů 25
3.2.2 Vlastnosti kalu jako paliva 27
3.2.3 Termické způsoby zpracování kalů 28
3.2.4 „Spolu-spalování“ kalů v teplárnách a elektrárnách 29
3.2.5 Spalování kalů ve spalovnách komunálního odpadu (SKO) 30
3.2.6 Speciální spalovny odvodněného kalu 31
3.2.7 „Spolu-spalování“ usušeného kalu v cementárnách 34

4 CEMENTÁRNA JAKO POTENCIÁLNÍ MÍSTO PRO SUŠENÍ KALŮ 38

4.1 TEPELNÝ POTENCIÁL POTŘEBNÝ PRO SUŠENÍ KALU 39
4.2 VYUŽITELNÝ TEPELNÝ POTENCIÁL SPALIN 40

5 TECHNOLOGIE SUŠENÍ KALŮ 44

5.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ SUŠÁREN KALŮ 44
5.2 ANALÝZA VHODNÉHO TYPU SUŠENÍ KALŮ 44
5.3 PRŮZKUM TRHU SE SUŠÁRNAMI KALŮ V ČR A ZAHRANIČÍ 46
5.4 VÝBĚR TYPU SUŠÁRNY 46
5.4.1 Vybraná technologie sušení kalů v diskové sušárně 47

6 OPTIMÁLNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU TEPLA PRO VYTÁPĚNÍ SUŠÁRNY 50

6.1 VÝBĚR TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA 50
6.2 STRATEGIE OPTIMÁLNÍHO NÁVRHU VÝMĚNÍKU SE SVAZKEM „U“-TRUBEK 51

6.3 TRUBKOVÝ VÝMĚNÍK SE SVAZKEM TRUBEK - „TUBE BUNDLE TYPE HEAT EXCHANGER“ 52
6.3.1 Výpočet tlakových ztrát ve výměníku tepla 54
6.3.2 Přenos tepla ve výměníku se svazkem trubek – „tube bundle“ 62
6.3.3 Problematika rovnoměrného rozdělení toku oleje v trubkách 68
6.4 TERMOFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI SPALIN A OLEJE 70
6.5 NÁKLADY NA ZAŘÍZENÍ PODÍLEJÍCÍ SE NA PŘENOSU TEPLA 71
6.5.1 Fixní náklady 72
6.5.2 Variabilní náklady 77
6.5.3 Rovnice celkových nákladů výměníku se svazkem trubek 78
6.6 OPTIMÁLNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU SE SVAZKEM TRUBEK 78
6.6.1 Stanovení nezávislých proměnných 78
6.6.2 Určení optimální konfigurace výměníku 84

7 EKONOMICKÁ ANALÝZA 87

7.1 INVESTIČNÍ NÁKLADY PROJEKTU - N_{IP} 87
7.2 CENY ZA ZPRACOVÁNÍ KALU 91
7.2.1 Náklady ČOV v okolí cementárny na zpracování kalů 91
7.2.2 Stanovení ceny (benefitu) za spalovaní kalů 92
7.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY PROVOZU 94
7.3.1 Náklady a úspory ročního provozu 94
7.4 BANKOVNÍ ÚDAJE - CENA PENĚZ 97
7.5 EKONOMICKÁ ANALÝZA Z POHLEDU PROJEKTANTA A INVESTORA 98
7.5.1 Pohled projektanta 98
7.5.2 Pohled investora 98
7.6 HODNOCENÍ EFEKTIVNOSTI INVESTICE 100
7.6.1 Doba návratnosti - PP (Payback Period) 100
7.6.2 Čistá současná hodnota - NPV (Net Present Value) 101
7.6.3 Vnitřní výnosové procento - IRR (Internal Rate of Return) 101
7.6.4 Výsledky zhodnocení investice 102
7.6.5 Analýza parametrické citlivosti 105

8 ZÁVĚR 108

9 LITERATURA 109

10 PUBLIKACE AUTORA 115

PŘÍLOHY 117

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

symbol	význam	jednotka
a	příčný (horizontální) poměr uspořádání trubek	m
a_f	anuitní factor	rok^{-1}
A	celková plocha výměny tepla	m^2
A_t	plocha výměny tepla jedné trubky	m^2
A_X	roční anuita	$Kč.rok^{-1}$
b	podélný (vertikální) poměr uspořádání trubek	m
b_K; $b_{K,F}$; $b_{K,P}$	koeficienty zohledňují cenový trend investičních nákladů daného zařízení	-
c	diagonální poměr uspořádání trubek	m
c_O	rychlost oleje v trubkách	$m.s^{-1}$
$c_{O,PR}$	rychlost oleje v propojovacím potrubí kolektorů	$m.s^{-1}$
c_K; $c_{K,F}$; $c_{K,P}$	koeficienty zohledňují cenový trend investičních nákladů daného zařízení	-
c_{kol}	rychlost oleje v kolektoru (distributoru) na vstupu (výstupu)	$m.s^{-1}$
c_N	rychlost spalin v nejužším průřezu (mezi trubkami)	$m.s^{-1}$
cp_S	měrná tepelná kapacita spalin (při střední teplotě)	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
cp_O	měrná tepelná kapacita oleje (při střední teplotě)	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
cp_{SO}	střední měrná tepelná kapacita oleje	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
cp_{SS}	střední měrná tepelná kapacita spalin	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
c_V	rychlost spalin ve volném průřezu výměníku	$m.s^{-1}$
C_F	fixní náklady	$Kč.rok^{-1}$
C_I	celkové investiční náklady	Kč
$C_{I,R}$	investiční náklady na rotač. stroje dopravující stlač. tekutiny	Kč
$C_{I,E}$	investiční náklady na výměník	Kč
$C_{I,P}$	investiční náklady na olejová čerpadla	Kč
$C_{I,F}$	investiční náklady na ventilátor	Kč
C_K	výsledná cena kalu jako paliva	$Kč.GJ^{-1}$
C_{KG}	kilogramová cena výměníku	$Kč.kg^{-1}$
C_M	náklady na údržbu	Kč

C_O	provozní náklady	Kč.rok^{-1}
$C_{O,\,F}$	provozní náklady vzniklé zvýšením tlakové ztráty spalin	Kč.rok^{-1}
$C_{O,\,P}$	provozní náklady spojené s tlak. ztrátou oleje ve výměníku	Kč.rok^{-1}
C_S	cena vstupní suroviny pro výpal slinku	Kč.t^{-1}
C_U; C_{KA}; C_{TA}	cena uhlí, kapalných a tuhých alternativních paliv	Kč.GJ^{-1}
C_V	variabilní náklady	Kč.rok^{-1}
C_T	celkové náklady výměníku tepla	Kč.rok^{-1}
C_Z	zůstatková cena zařízení	Kč
CF_P; CF_I	tok peněz (cash flow) z pohledu projektanta, resp. investora	Kč.rok^{-1}
CF_0	současná (diskontovaná) hodnota toku peněz	Kč.rok^{-1}
CF_j	hodnota toku peněz v roce j	Kč.rok^{-1}
$CF_{K,j}$	kumulovaný diskontovaný tok peněz v roce j	Kč.rok^{-1}
$CF_{0,j}$	diskontovaná hodnota toku peněz v roce j	Kč.rok^{-1}
d	vnější průměr trubky	m
d_i	vnitřní průměr trubky	m
D_O	daňové odvody	Kč.rok^{-1}
$D_{h,kol}$	hydraulický průměr kolektoru (distributoru)	m
f_A	faktor uspořádání trubek	-
$f_{n,t}$	korekční faktor počtu řad při turbulentním proudění	-
$f_{u,l}$	faktor uspořádání při laminárním proudění	-
$f_{u,t}$	faktor uspořádání při turbulentním proudění	-
$f_{z,l}$	korekční faktor pro neizotermní laminární proudění	-
$f_{zn,l}$	korekční faktor počtu řad při neizotermním lamin. proudění	-
$f_{z,t}$	korekční faktor pro neizotermní turbulentní proudění	-
F	korekční faktor křížového toku	-
H_0	současná hodnota hotovosti	Kč
H_j	hodnota hotovosti získaná za j roků	Kč
j	počet roků	-
k	součinitel prostupu tepla	W.m^{-2}.K^{-1}
k_i	ekvivalentní drsnost potrubí	m
k_E	cena elektrické energie	Kč.(Wh)$^{-1}$
k_1; k_2	součinitele pro výpočet změn tlaku v kolektoru (distributoru)	-
K	faktor teplotní závislosti	-
l_{kol}	délka kolektoru, resp. distributoru	m

l_t	délka trubky	m
l_{tc}	celková délka trubky jednoho proudu (v rámci jedné sekce)	m
l_V	délka výměníku	m
L	charakteristický lineární rozměr	m
LHV_{KA}	výhřevnost kapalných alternativních paliv	$GJ.t^{-1}$
LHV_{TA}	výhřevnost tuhých alternativních paliv	$GJ.t^{-1}$
LHV_U	výhřevnost černého uhlí	$GJ.t^{-1}$
LHV_V; LHV_S	výhřevnost vyhnilých, resp. surových kalů	$GJ.t^{-1}$
m_O	hmotový průtok oleje	$kg.s^{-1}$
m_S	hmotový průtok spalin	$kg.s^{-1}$
$m_{SK,V}$; $m_{SK,S}$	množství usušených kalů vyhnilých a surových za rok	$t.rok^{-1}$
m_E	hmotnost výměníku	kg
m_{KA}; m_{TA}	množství spálených kapalných a tuhých alternativních paliv	$t.h^{-1}$
m_{TM}	průtok pracovní látky v trubce s nejmenším průtokem	$kg.s^{-1}$
m_{TS}	střední průtok trubkami příslušné výhřevné plochy	$kg.s^{-1}$
m_U	množství spáleného uhlí	$t.h^{-1}$
n	exponent závislý na druhu plynu	-
n_t	celkový počet trubek ve výměníku	-
n_{tr}	počet trubek v řadě	-
N_A	roční amortizační náklady	$Kč.rok^{-1}$
N_D	celkové roční náklady na dopravu	$Kč.rok^{-1}$
N_E	náklady na elektrickou energii celé technologie sušení kalů	$Kč.rok^{-1}$
N_{IP}	celkové investiční náklady projektu	Kč
N_{IR}	investiční náklady v daném roce	$Kč.rok^{-1}$
N_P	počet překážek ve směru proudění spalin	-
$N_{P,B}$	běžné provozní náklady (na palivo)	$Kč.rok^{-1}$
$N_{P,SK}$	provozní náklady při spalování kalů sušených v nově uvažované technologii	$Kč.rok^{-1}$
N_R	počet řad trubek	-
N_S	počet sekcí výměníku	-
N_{SK}	veškeré náklady spojené se sušeným kalem	$Kč.rok^{-1}$
$N_{SK,P}$	náklady na kal, jakožto palivo	$Kč.rok^{-1}$
N_U; N_{KA}; N_{TA}	náklady na uhlí, kapalná a tuhá alternativní paliva	$Kč.rok^{-1}$
N_{UDR}	náklady na údržbu a opravy technologie sušení kalů	$Kč.rok^{-1}$

Nu	Nusseltovo číslo	-
Nu_O	Nusseltovo číslo oleje	-
$Nu_{O,0}$	Nusseltovo číslo oleje při turbulentním proudění trubkou	-
Nu_{turb}	Nusseltovo číslo při turbulentním proudění	-
Nu_{SV}	Nusseltovo číslo pro svazek trubek zahrnující vliv teploty	-
$Nu_{SV,0}$	Nusseltovo číslo pro svazek trubek	-
Nu_{TR}	Nusseltovo číslo při obtékání jedné samotné trubky	-
O_L	lineární odpis	$Kč.rok^{-1}$
p_O	střední tlak oleje	Pa
p_S	střední tlak spalin	Pa
p_{S1}	tlak spalin na vstupu do výměníku	Pa
p_{S2}	tlak spalin na výstupu výměníku	Pa
P	termická účinnost	-
P_{eq}	příkon zařízení	W
Pr_S	Prandtlovo číslo spalin	-
Pr_O	Prandtlovo číslo oleje	-
$Pr_{O,W}$	Prandtlovo číslo oleje při střední teplotě stěny trubky	-
q	parametr určující velikost nákladů na údržbu	-
$\dot{q}$	měrný tepelný tok	$W.m^{-2}$
$\dot{Q}$	tepelný tok	W
r	počet řad jednoho chodu	-
r_d	diskontní sazba	-
R	poměru tepelných kapacit	-
Re_S	Reynoldsovo číslo na straně spalin	-
Re_O	Reynoldsovo číslo oleje	-
$Re_{M,O}$	mezní Reynoldsovo číslo oleje	-
Re_ψ	Reynoldsovo číslo v mezitrubkovém prostoru	-
R_{f1}	součinitele zanášení (fouling factor) na straně oleje	$m^2.K.W^{-1}$
R_{f2}	součinitele zanášení (fouling factor) na straně spalin	$m^2.K.W^{-1}$
s_{DP}	sazba daně z příjmu právnických osob	-
s_1	příčná rozteč trubek	m
s_2	podélná rozteč trubek	m
s_3	diagonální rozteč trubek	m
S_t	průtočný průřez trubky	m^2

t	tloušťka stěny trubky	m
t_O	střední teplota oleje	°C
t_{O1}	teplota oleje na vstupu do výměníku	°C
t_{O2}	teplota oleje na výstupu výměníku	°C
t_S	střední teplota spalin	°C
t_{S1}	teplota spalin na vstupu do výměníku	°C
t_{S2}	teplota spalin na výstupu výměníku	°C
t_W	střední teplota stěny trubky	°C
T_O	počet let odpisu	-
T_S	střední teplota spalin ve stupních Kelvina	K
T_W	střední teplota stěny trubky ve stupních Kelvina	K
T_Z	počet roků ekonomické doby životnosti zařízení	-
u	úroková míra - vnitřní výnosové procento	%
U_{CP}	celkové provozní úspory	$Kč.rok^{-1}$
U_H	hrubé úspory	$Kč.rok^{-1}$
U_P; U_I	úspory z pohledu projektanta, resp. investora	$Kč.rok^{-1}$
U_S	úspory za surovinu	$Kč.rok^{-1}$
V	objemové průtok dopravované tekutiny	$m^3.s^{-1}$
V_O	objemový průtok oleje	$m^3.s^{-1}$
V_S	objemový průtok spalin	$m^3.s^{-1}$
x, y	rozměry stran volného průtočného průřezu výměníku	m
Z_L	roční zisky vyplývající z likvidace kalů daným ČOV	$Kč.rok^{-1}$
α	součinitel přestupu tepla	$W.m^{-2}.K^{-1}$
α_O	součinitel přestupu tepla na straně oleje	$W.m^{-2}.K^{-1}$
α_S	součinitel přestupu tepla na straně spalin	$W.m^{-2}.K^{-1}$
Δp	celková tlaková ztráta	Pa
Δp_O	tlaková ztráta oleje ve výměníku	Pa
$\Delta p_{O,C}$	celková tlaková ztráta oleje v olejovém okruhu	Pa
$\Delta p_{O,TR}$	tlaková ztráta v trubkách jedné sekce výměníku	Pa
$\Delta p_{O,KOL}$	tlaková ztráta oleje vstupního a výstupního kolektoru sekce	Pa
$\Delta p_{O,PROP}$	tlaková ztráta oleje propojení kolektorů	Pa
Δp_S	tlaková ztráta spalin ve výměníku	Pa
$\Delta p_{S,C}$	celková tlaková ztráta spalin spalin	Pa

Δp_x	tlaková ztráta pro vyčíslení provozních nákladů	Pa
Δt_{ln}	logaritmický teplotní rozdíl	℃
ΔT	teplotní gradient oleje	K
ΔT_M	střední teplotní rozdíl	K
ΔT_{ln}	střední teplotní logaritmický spád	K
η_C; η_{CF}; η_{CP}	celková účinnost soustrojí, ventilátoru, čerpadla	-
η_h	součinitel hydraulické nerovnoměrnosti	-
η_S	dynamická viskozita spalin	Pa.s
η_O	dynamická viskozita oleje	Pa.s
$\eta_{S,W}$	dynamická viskozita spalin při střední teplotě stěny trubky	Pa.s
λ	tepelná vodivost média	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_t	tepelná vodivost trubky	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_O	tepelná vodivost oleje	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_{OL}	součinitel tření oleje v trubce	-
λ_S	tepelná vodivost spalin	$W.m^{-1}.K^{-1}$
ψ	součinitel podílu mezitrubkového prostoru	-
ρ_S	hustota spalin	$kg.m^{-3}$
ρ_O	hustota oleje	$kg.m^{-3}$
$\tau_{R,KA}$; $\tau_{R,TA}$	roční doba provozu s kapalným a tuhým alternativ. palivem	h
$\tau_{R,SK}$; $\tau_{R,U}$	roční doba provozu se sušeným kalem, resp. černým uhlím	h
ξ	součinitel tlakové ztráty	-
ξ_l	součinitel tlakové ztráty při laminárním proudění	-
ξ_t	součinitel tlakové ztráty při turbulentním proudění	-
ξ_O	součinitel tlakové ztráty při proudění oleje	-
$\xi_{O,T}$	součinitel místního odporu trubk. hadu	-
$\xi_{O,PR}$	součinitel místního odporu propojení kolektorů	-

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

zkratka	význam
AOX	Adsorbovatelné organické halogenidy
EO	Ekvivalent obyvatel
BSE	Hovězí spongiformní encephalopatie
ČKAIT	Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě
ČR	Česká republika
ČSN	Chráněné označení českých technických norem
ČOV	Čistírna odpadních vod
DPH	Daň z přidané hodnoty
EC	European Commission - Evropská Komise
EEC	European Economic Community - Evropské hospodářské společenství
EU	Evropská unie
IRR	Internal rate of return - vnitřní výnosové procento
MaR	Měření a regulace
NPV	Net present value – čistá současná hodnota
OSN	Organizace spojených národů
PAU	Polycyklické aromatické uhlovodíky
PCB	Polychlorované bifenyly
PCDD/ F	Polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD) a dibenzofurany (PCDF)
PET	Polyetylén tereftalát - plast
PP	Payback period - diskontovaná doba návratnosti
OZE	Obnovitelné zdroje energie
SKO	Spalovna komunálních odpadů
SSK	Směsný surový kal
TE	Koeficient ekvivalentu toxicity
TK	Těžké kovy
TZL	Tuhé znečisťující látky
ÚČOV	Ústřední čistírna odpadních vod
VOC	Volatile organic compounds - prchavé (těkavé) organické sloučeniny
VUOS	Výzkumný ústav organických syntéz
VÚV T.G.M	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka

1 ÚVOD

1.1 TÉMATICKÉ ZAMĚŘENÍ PRÁCE

V souvislosti s rozvojem, modernizací a industrializací lidské společnosti je možné sledovat neustálý růst spotřeby energie a to na celosvětové úrovni [1]. Tomuto problému je věnována značná pozornost, neboť zásoby fosilních zdrojů energie, které pro většinu zemí světa představují primární energetické zdroje, jsou omezené. Světová spotřeba primárních zdrojů energie je pokryta z 27 % uhlím, 40 % ropou, 25 % zemním plynem, 8 % kryjí ostatní zdroje [2]. V České republice dominuje jako primární zdroj energie uhlí – cca 51,6 % [3]. I když nelze zcela přesně určit zásoby fosilních paliv, při současných trendech ve spotřebě se odhadují následovně: uhlí na cca 230 let, ropa cca 30 let, zemní plyn cca 61 let [4], [5].

Nejen z těchto důvodů jsou vyvíjeny snahy tyto omezené zdroje energie nahradit zdroji obnovitelnými. Spalování fosilních paliv je totiž jednou z hlavních činností, při kterých je do ovzduší uvolňován oxid uhličitý a další znečisťující látky přispívající k tvorbě skleníkového efektu. Následkem toho dochází na celém světě k poměrně častým výkyvům počasí (letní sucha, enormní přívaly srážek, atd.) a zhoršování kvality životního prostředí. Jeden z nedávných výzkumů týkající se následků zvýšeného množství oxidu uhličitého v atmosféře prokázal, že oxid uhličitý znatelným způsobem okyseluje mořskou vodu a negativně působí na korálové útesy. Bude-li trend pokračovat, hrozí zničení korálových útesů (které působí v mnoha částech světa nejen jako ochrana před bouřemi a tsunami), tím k odumření některých druhů živočichů a nabourání celého ekosystému [6]. Snížit v letech 2008-2012 celkové světové emise oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů o 5,2 procenta v porovnání s rokem 1990 bylo již podpořeno zástupci 159 zemí (včetně ČR) na Summitu OSN o změnách klimatu v japonském Kjótu [7], v roce 2004 se přidalo i Rusko a tzv. „Kjótský protokol“ tím vstoupil v platnost. Je patrné, že problém zasahuje svou šíří nejen do oblasti průmyslové, ekonomické a ekologické, ale i sociální. Na mezinárodní konferenci o obnovitelných zdrojích Renewable 2004 k tomuto tvrzení přispěl jeden z předních představitelů německé politické scény výrokem, že: „jednostranná závislost hospodářství na ropě zvyšuje zranitelnost mezinárodním terorismem“ [8]. Důvodů pro postupné nahrazování klasických paliv alternativními je více, je však zřejmé, že bez využívání těchto zdrojů energie se brzy lidská společnost třetího tisíciletí neobejde.

Dalším významným problémem, souvisejícím s úsporou fosilních paliv, je nakládání s odpady. Jejich množství se v rozvíjejících se zemích neustále zvyšuje. Praktické pokyny jak přistupovat k řešení tohoto problému jsou obsažené např. v zákonech Evropské unie (EU) – 91/156/EEC a v současnosti jsou implementovány i do naší legislativy (novelizovaný zákon č.185/2001 o odpadech). Při rozhodování o nakládání s odpady by se mělo postupovat následujícím způsobem:

1. Zamezit vzniku odpadů
2. Využít odpad materiálově
3. Využít energetický obsah odpadu
4. Odpad odstranit (zneškodnit)

Do zmíněné oblasti nakládání s odpadem spadá i často problematický, koncový produkt čistíren odpadních vod (ČOV), kal. Náklady na zpracování kalu nejsou malé, v jednotlivých ČOV jsou proměnné (záleží na způsobu konečného zpracování), běžně se však pohybují okolo ½ provozních nákladů ČOV. Při pohledu na nakládání s kalem jako s odpadem dle předpisů EU i ČR můžeme konstatovat následující:

1. Vzniku kalu zamezit nelze. Je možné množství kalu pouze redukovat (např. metodou zpracování odpadní vody - anaerobní digesce). Vstupem České republiky do EU však dochází k nárůstu množství kalu produkovaného v ČOV, neboť dle platné legislativy jsou obce s více jak dvěma tisíci ekvivalentními obyvateli (EO) povinné vybudovat nejen funkční kanalizaci, ale i dvoustupňové mechanicko-biologické čistění odpadních vod.
2. Materiálové využití kalu je zastoupeno především aplikací na zemědělskou půdu, která je však omezena zpřísňujícími se legislativními nařízeními a možnostmi upotřebení. Je tedy nutné hledat další možnosti zpracování kalu.
3. Energetické využití kalu je zastoupeno především jeho spálením ve speciálních spalovnách (fluidní, etážové, atd.) s využitím energie obsažené ve spalinách. Tento způsob se v současné době dostává do popředí právě díky omezeným možnostem použití kalu v zemědělství. Investiční náklady jsou poměrně vysoké.
4. Odstranění kalu je až na posledním místě. Můžeme sem zařadit především ukládání kalu na skládky. I když je tento způsob nakládání s kalem až na posledním místě, řadí se v České republice mezi nejpoužívanější.

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 zapracován do slinku a kal je využit i materiálově. V České republice již běží projekt spalování kalu v cementárně. Kal je zde však za nemalých provozních nákladů vysušen spalováním primárního paliva - zemního plynu, přímo v ČOV . Tato disertační práce je věnována myšlence využití přebytečného tepla cementárny pro sušení odvodněných kalů v provozu cementárny.

1.2 ZPRACOVÁNÍ KALŮ Z ČÍSTÍREN ODPADNÍCH VOD

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 spoluspálením v rotační peci pro výpal slinku.

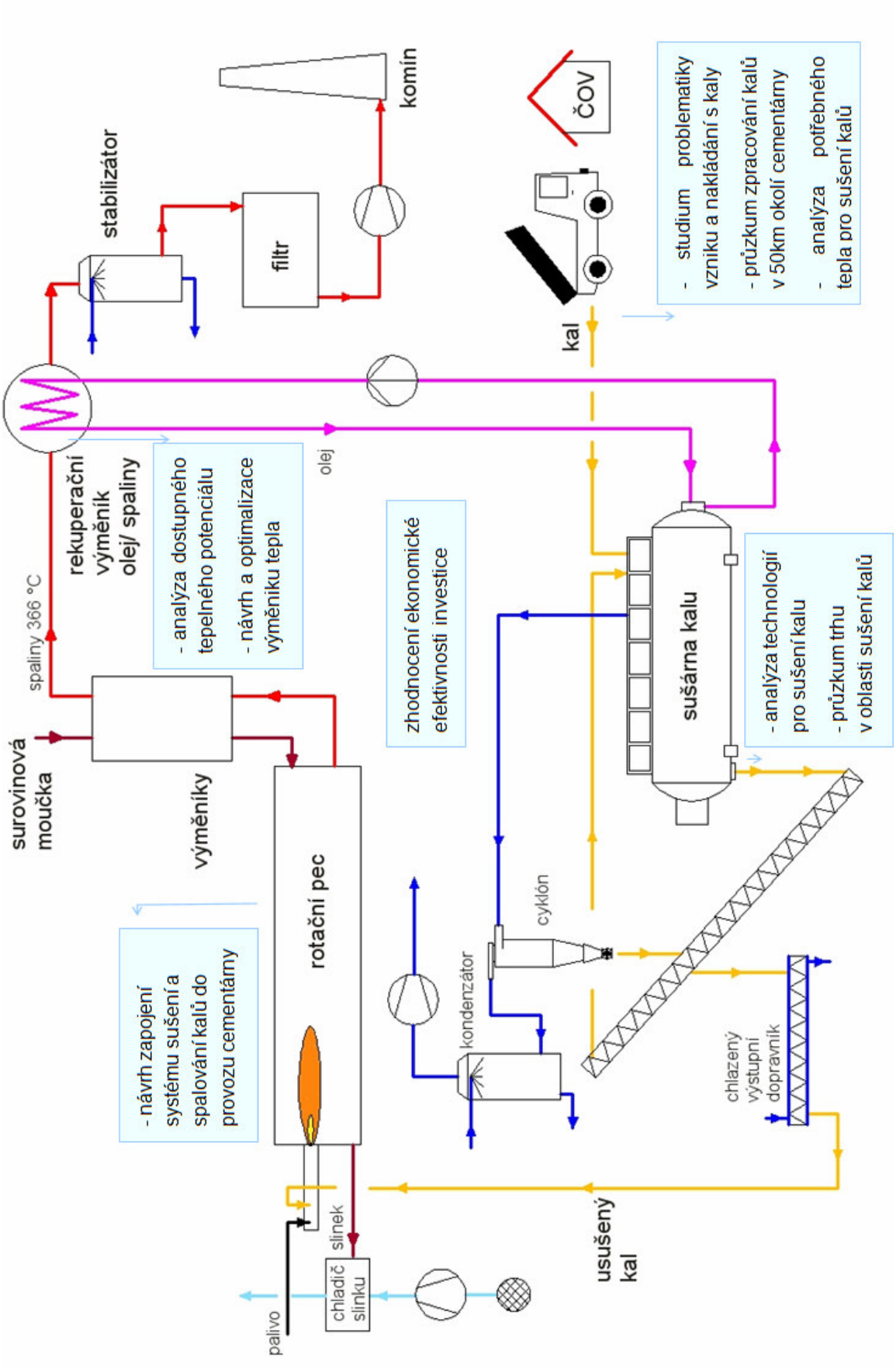
Uvažovaný projekt počítá s dopravou mechanicky odvodněných kalů z okolních čistíren, z okruhu asi 50 km do cementárny jak je pro ilustraci ukázáno na obr. 1.



Obr. 1 Uvažovaný okruh 50 km pro svoz odvodněných kalů

Práce se věnuje zejména prověření technických možností realizovatelnosti s následným návrhem vlastního řešení a ekonomickým zhodnocením této ideje.

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. Jak bylo v předchozí kapitole zmíněné, v ČR již takovýto projekt spalování kalů, sušených v ČOV zemním plynem, běží. Produkce kalu, odvodněného na asi 30 % sušiny, je cca 100 t/ den a je téměř shodná s produkcí ze zmíněného 50km okruhu. 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 H_2O/ den), vychází náklady ~18,5 mil Kč/ rok.



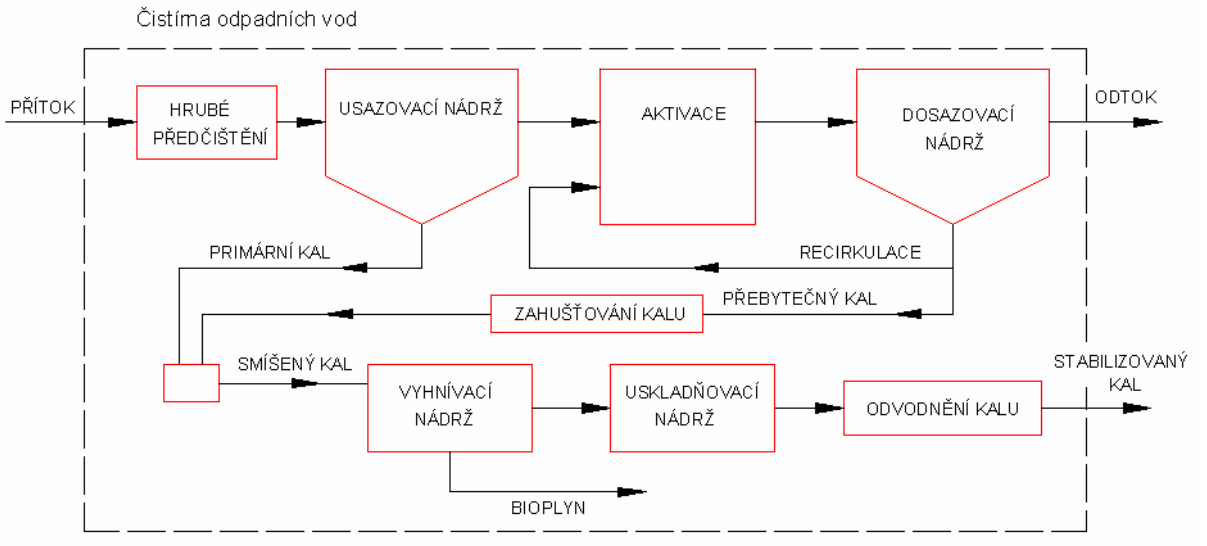
Obr. 2 Obsah a řešené oblasti dizertační práce

2 KAL Z *ČOV*

Kal z ČOV je suspenze pevných a koloidních částic, organických a anorganických látek ve vodě [9]. Je to nevyhnutelný odpad vznikající jako vedlejší produkt procesu čistění odpadních vody. Při tomto procesu čistění jsou odstraňovány nežádoucí složky, které jsou koncentrovány do kalu. V něm je obsaženo přibližně 50 až 80 % původního znečistění odpadní vody [10].

2.1 VZNIK, DRUHY A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KALU Z *ČOV*

Kaly můžeme obecně rozdělit na průmyslové a komunální. Kaly produkované v oslovených ČOV v padesátikilometrovém okruhu cementárny, jsou až na jedinou vyjimku komunální. Vznik kalu v typické komunální ČOV s anaerobní stabilizací je schematicky znázorněn na obr. 3. Při čistění odpadních vod vzniká nejdříve tzv. kal primární, který se usazuje v primárních usazovácích. Při následném biologickém čistění vzniká kal přebytečný (sekundární, biologický), který se usazuje v dosazovacích (sekundárních usazovacích) nádržích. Přebytečný kal smíchaný s primárním kalem je označován jako kal smíšený. Kal ve stavu, v jakém byl odstraněn z odpadní vody, se nazývá kal surový. Protože v kalu z ČOV převládají organické látky, jedná se o tzv. hnilobný kal [11], který se musí nezbytně dále zpracovávat. Při jeho skladování se rozkládají obsažené biologické látky a ve spodních vrstvách nastávají anaerobní pochody za vzniku páchnoucích a hygienicky závadných látek. Musí být proto stabilizován (aerobní či anaerobní stabilizací). Obvykle je kal zpracováván anaerobním procesem (metanizací) za vzniku bioplynu a anaerobně stabilizovaného (vyhnilého) kalu. Obsah vody je následně snížený prostřednictvím dekantačních odstředivek či pásových lisů na cca 70 až 80 %.



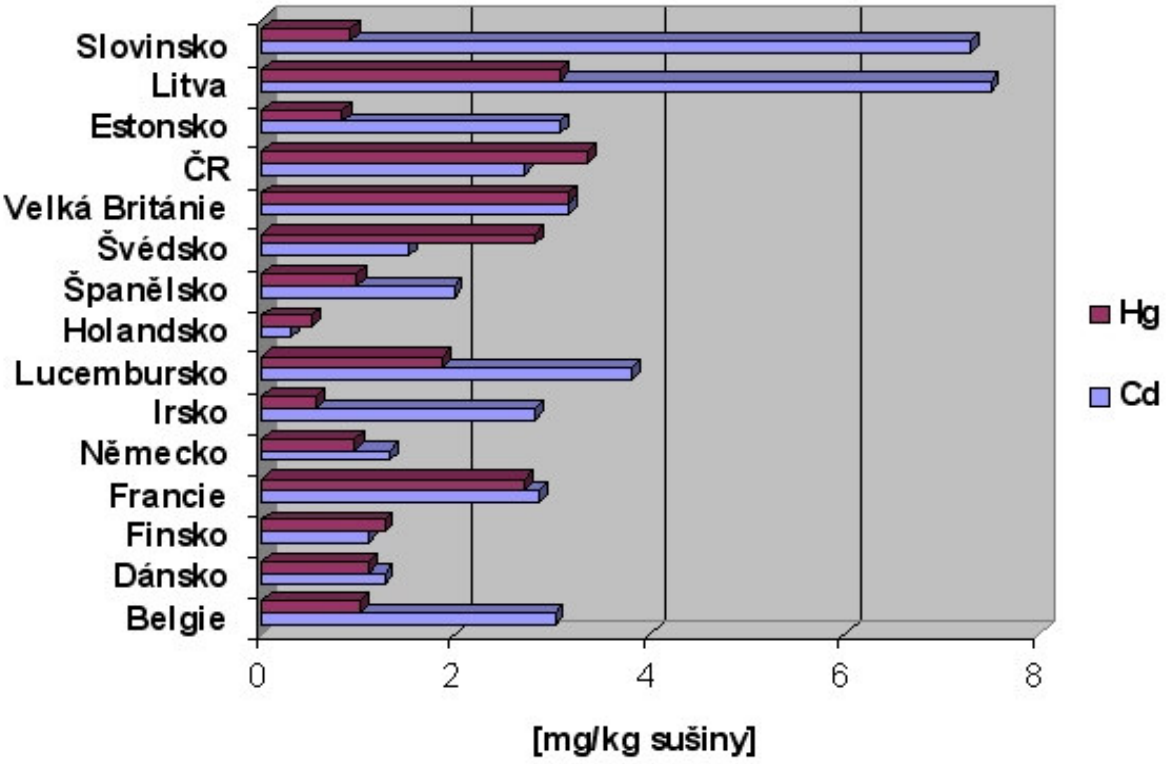
Obr. 3 Vznik kalu při procesu čistění odpadních vod

Surový kal obsahuje kolem 70 % organických látek, vyhnilý již jen 50 %, a to díky procesu metanizace. Množství sušiny vyhnilého kalu je o cca 40 % nižší než u kalu surového. Hlavní část organických látek tvoří bílkoviny, uhlovodany (cukry), tuky a oleje [12], obsaženy mohou být i toxické látky (PCB, PAU, PCDD/F, pesticidy, atd.), zbytky léků, přirozené a umělé hormony, apod. Kal dále obsahuje anorganické sloučeniny křemíku, hliníku, železa, vápníku, hořčíku, aj., těžké kovy a patogenní mikroorganismy. Mezi nejzávažnější patogenní mikroorganismy obsažené v kalu patří salmonela, zárodky virových onemocnění, fekální streptokoci, prvoci, vajíčka parazitických červů [13], objevují se i obavy z obsahu a šíření hovězí spongiformní encephalopathie (BSE) [14]. V následující tabulce (tab. 1 [15]) je uveden příklad obsahu toxických látek v kalu z 60 malých obcí Jihomoravského kraje v letech 1999 až 2002. Hodnoty škodlivých látek v kalu ze středních a velkých ČOV byly obdobné.

Roční produkce kalu	parametr	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	AOX	PCB
		mg/kg sušiny									
	limit aplikace na půdu	**30**	**5**	**200**	**500**	**4**	**100**	**200**	**2500**	**500**	**0,6**
	limit kompostování	**50**	**13**	**1000**	**1200**	**10**	**200**	**500**	**3000**	-	-
do 250 t	**min**	0	0,2	1	8,2	0,3	1	2,92	71	0,27	0,002
	max	23,5	18	308	456	14	337	470	2964	608	2,1
	počet dat	195	143	216	214	188	215	216	217	45	41
	průměr	5,19	4,02	56,36	183,6	2,61	42,19	71,30	1416	278,7	0,43
	přes limit přímé aplikace [%]	0,00	8,39	1,39	0,00	17,55	1,86	1,39	1,84	4,44	19,51
	přes limit kompostování [%]	0,00	0,70	0,00	0,00	2,66	0,93	0,00	0,00	-	-

Tab. 1 Obsah těžkých kovů v kalech – Jihomoravský kraj [15]

Mezi nejobávanější těžké kovy patří rtuť, a to nejen z důvodů vysoké toxicity, ale i pro specifické vlastnosti působící problémy zejména při termickém zpracování kalů. Průměrný obsah rtuti v kalech (viz graf 1, [16]) v České republice se pohybuje okolo 3 mg/kg sušiny. Z výše uvedených důvodů je tedy nutné s kaly nakládat odpovídajícím způsobem.

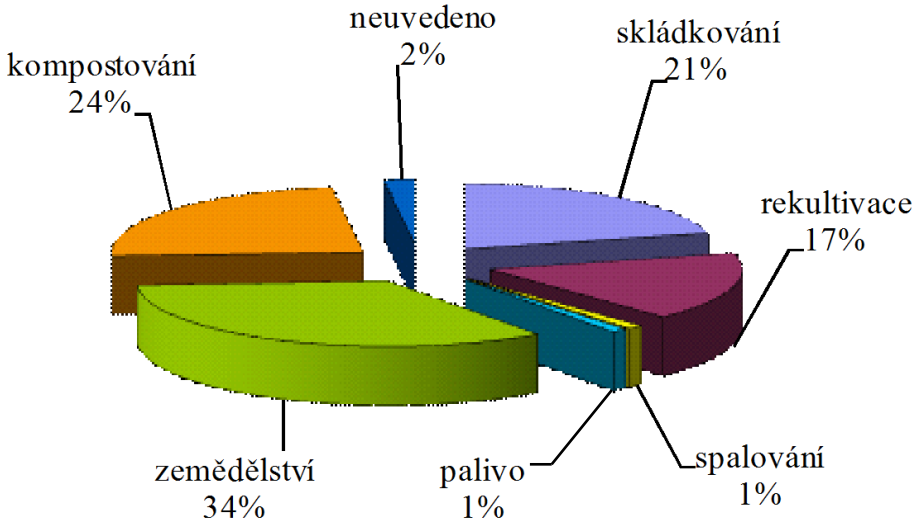


Graf 1 Průměrný obsah rtuti a kadmia v kalech v ČR a ve vybraných evropských zemích [16]

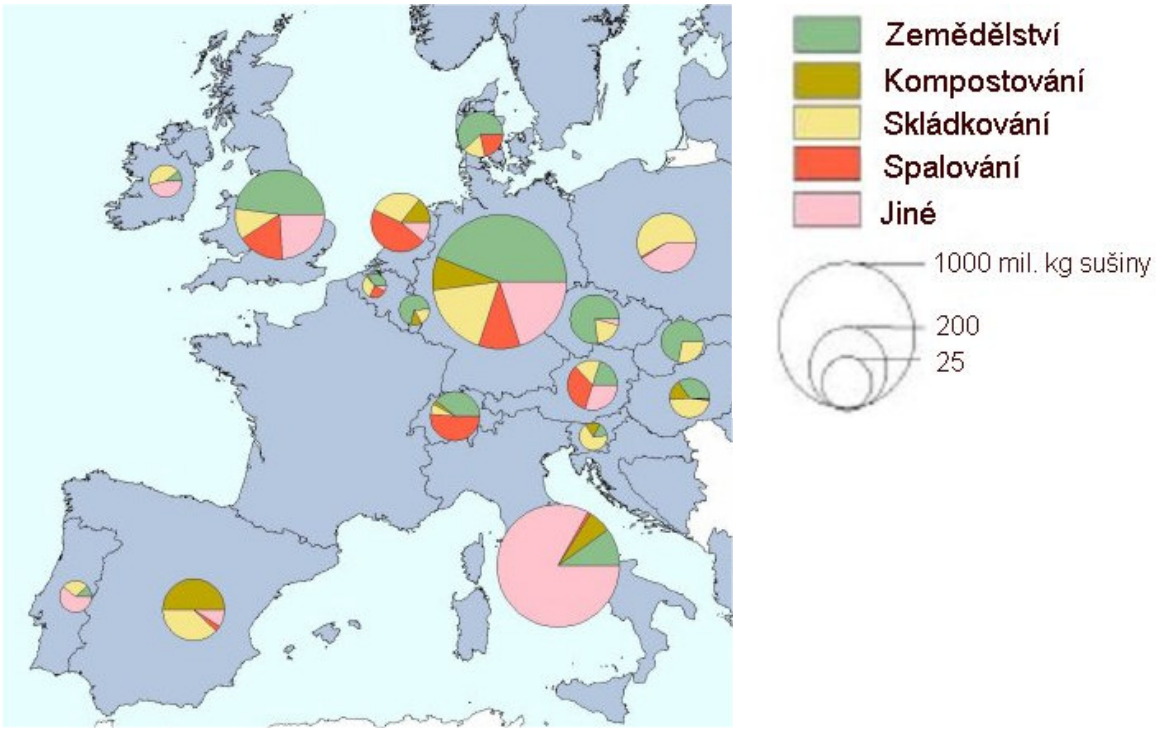
Limitní hodnoty pro použití kalů v zemědělství jsou pro rtuť 4 mg/ kg sušiny pro použití v zemědělství a 10 mg/ kg sušiny pro účely kompostování. U kadmia je povoleno 5 mg/ kg sušiny pro použití v zemědělství a 13 mg/kg sušiny pro možnost zpracování kalů kompostováním.

2.2 SITUACE KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ V ČR A VYBRANÝCH EVROPSKÝCH ZEMÍCH

Nakládání s kaly v ČR každoročně mapuje VÚV T.G.M. v Praze. Graf 2 znázorňuje stav v roce 2001 [17], kdy celková produkce sušiny kalu se pohybovala okolo 206 kt/ rok. Jak je z grafu patrné, je v současnosti většina kalů v ČR, podobně jako v zahraničí [18], [19], aplikována přímo či nepřímo na zemědělskou půdu nebo uložena na skládce. V blízké době se však tyto hodnoty pravděpodobně změní, neboť kal v brněnské ČOV je sušen a měl by být spalován v nedaleké cementárně Mokrá. V současné době se také vybírá vhodný způsob termického zpracování kalů z ÚČOV v Praze. Následující obr. 4 ukazuje stav v některých evropských zemích v roce 1999 [20]. Ve srovnání s naší zemí je zřejmý větší podíl termického způsobu zpracování kalů.



Graf 2 Zpracování kalů z ČOV v ČR [17]



Obr. 4 Nakládání s kalem v některých evropských zemích [20]

3 ZPRACOVÁNÍ KALŮ

Hlavní způsoby zpracování často problematického výstupu ČOV – kalů je možné rozdělit do dvou skupin na nedestruktivní a termické, jak blíže popisují kapitola 3.1 a 3.2).

3.1 NEDESTRUKTIVNÍ ZPŮSOBY ZPRACOVÁNÍ KALŮ

Mezi nedestruktivní způsoby zpracování kalů patří především následující činnosti:

- přímá aplikace na zemědělskou půdu, kompostování
- ukládání na skládku, rekultivace
- ostatní (např. solidifikace, atd.)

3.1.1 Využití kalů v zemědělství

Stabilizované čistírenské kaly představují svým bohatým obsahem organických látek, živin a biologicky aktivních látek významný doplňkový zdroj pro zemědělskou půdu. Hnojivý účinek kalů spočívá především v obsahu pro půdu příznivých prvků (N, P, K, Ca, Mg), dostatku organické hmoty a obsahu stopových prvků nezbytných pro zdárný vývin a růst rostlin. Aktivovaný kal se dle [21] jeví jako výtečný kondicionér, neboť humusový materiál je dobrou živnou půdou pro růst kořenů, zatímco se postupně uvolňují stopové prvky, podporujících optimální růst rostliny. Pro obsah škodlivých látek však na druhou stranu kaly představují značná hygienická a ekologická rizika jako znečistění spodních a povrchových vod, kontaminaci půdy, následně vegetace a tím i potravního řetězce. V současné době se přímá aplikace čistírenských kalů na zemědělskou půdu řídí prováděcí vyhláškou č. 382/2001 Sb., novelizace s formálními úpravami této vyhlášky je obsažena ve vyhlášce č. 504/2004 Sb. Tyto vyhlášky jsou plně v souladu se směrnicí Rady EU č. 86/278/EEC a určují, za jakých podmínek lze čistírenské kaly v zemědělství využívat (obsah těžkých kovů, patogenních mikroorganismů, četnost a místo aplikace (druh plodin), apod.).

Tab. 2 ukazuje limitní hodnoty obsahu těžkých kovů v kalech určených pro přímou aplikaci, obsažené ve vyhlášce č.382/2001 Sb., resp. pro kompostování obsažené v ČSN 46 5735. Po stránce ekonomické je přímou aplikaci kalů možné označit za nejpřijatelnější, neboť náklady ČOV jsou v porovnání s ostatními způsoby zpracování kalu nejnižší, někdy i nulové.

prvek	přímá aplikace na půdu [mg/kg sušiny]		surovina pro výrobu kompostu [mg/kg sušiny]
	382/2001 Sb.	86/278/EEC	ČSN 46 5735
As	30	-	50
Cd	5	20 - 40	13
Cr	200	-	1000
Cu	500	1000 -1750	1200
Hg	4	16 - 25	10
Ni	100	300 - 400	200
Pb	200	750 - 1200	500
Zn	2500	2500 - 4000	3000

Tab. 2 Limitní obsahy těžkých kovů v kalech pro použití v zemědělství



Obr. 5 Kompostování biodegradabilních odpadů

3.1.2 Ukládání kalu na skládky, rekultivace

Tato metoda je v České republice spolu s využitím kalu pro zemědělské účely druhou nejrozšířenější. Poplatky za uložení jsou však relativně vysoké a neustále rostou. Po přistoupení ČR do EU je skládkování kalů dále omezováno platnou legislativou, která přímo zakazuje skladování neupravených kalů (kaly bez fyzikální a chemické stabilizace) a zároveň striktně omezuje podíl biodegradabilních odpadů na skládkách. Protože skládkování kalů je považováno za nejhorší způsob odstranění, předpokládá se, že objem takto likvidovaných kalů se bude postupně snižovat. Při ukládání surových či vyhnilých kalů na skládku vzniká řada nebezpečí jako kontaminace půdy, vody, zápach,… a dále při hnilobných procesech často unikají do ovzduší skleníkové plyny (CO_2 a CH_4, který je pouze v několika málo případech [22] sbírán a energeticky využit). Podle směrnice EU 99/31/EEC je nutné snížit množství biodegradabilních odpadů ukládaných na skládku, a to konce roku 2010 na 75 % produkce roku 1995. Po roku 2010 jsou touto směrnicí stanovena další snížení množství těchto odpadů ukládaných na skládky. Podobně je tomu i v české legislativě (zákon č. 185/2001 o odpadech), kde je snaha omezit ukládání veškerých odpadů na skládky zřejmá z průběžného zvyšování poplatků. Limitní hodnoty pro terénní úpravy, rekultivace či uložení na skládce dle 383/ 2001 Sb. ukazuje následující tab. 3 [23]. Podle [24] je v současné době připravována v ČR vyhláška zakazující ukládání na skládku odpadů s obsahem biodegradabilních látek > 5 %. Tento fakt by představoval zvýšenou orientaci k jiným, především termickým způsobům zpracování kalu.

Ukazatel	**383/ 2001 Sb.**		
	výluh I, terénní úpravy [mg/l]	výluh II, rekultivace skládek [mg/l]	výluh III, skládka S-O [mg/l]
As	0,05	0,1	5
Cd	0,005	0,05	0,5
Cr	0,1	1	50
Cu	0,5	1	
Hg	0,002	0,005	0,05
Ni	0,1	0,5	50
Pb	0,1	0,5	10
Zn	5	5	
PCB	0,2 mg/ kg	10 mg/ kg	<20 mg/ kg
Mikrobiální rozbory	Nesmí mít nebezpečnou vlastnost	Nesmí mít nebezpečnou vlastnost	Nesmí mít nebezpečnou vlastnost

Tab. 3 Limitní hodnoty ukazatelů výluhu [23]

3.2 TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ KALŮ

Termické zpracování kalů se ukazuje jako perspektivní způsob nakládání s kaly. Jaké důvody k tomu vedou a jaké způsoby se v praxi se nejčastěji používají, popisují následující kapitoly.

3.2.1 Hlavní důvody pro termické zpracování kalů

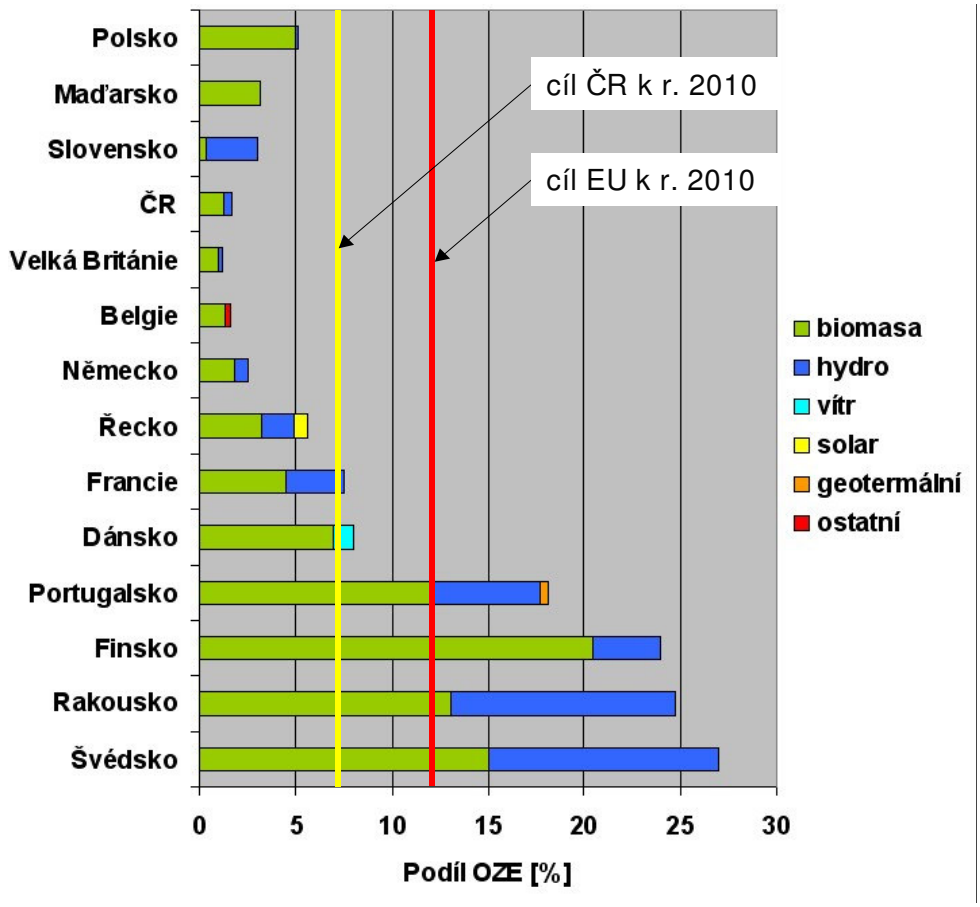
Přesto, že je současné době v ČR zpracována termickým způsobem pouze malá část kalů (cca 2 % - viz graf 2), lze předpokládat, že v blízké budoucnosti se tento podíl zvýší. Na základě studia nakládání s kaly můžeme jako hlavní důvody pro termické zpracování kalů jmenovat následující:

- Nesplnění podmínek pro použití v zemědělství (obsah těžkých kovů a patogenních mikroorganismů, četnost a místo použití) nebo nižší poptávka ze strany zemědělců a zpřísňující legislativa pro aplikaci v zemědělství
- Trend zvyšování poplatků za ukládání na skládku (částečně vyplývá z nařízení stanovených v zákoně 185/2001 o odpadech) s postupnou snahou úplného zákazu ukládání na skládku [22].
- Povinnosti uložené legislativou:
  - snížit množství biodegradabilních odpadů ukládaných na skládky do konce roku 2010 na 75 % produkce roku 1995 (implementace směrnice EU 99/31/EC), v dalších letech následuje opětovné snížení. Jak zmiňuje [25], tyto opatření mají především za cíl snížit tvorbu metanu jakožto skleníkového plynu z anaerobních procesů a zvýšení podílu separovaného sběru odpadů s následným zhodnocováním a recyklací. Metan je totiž vzhledem k oxidu uhličitému z pohledu účinku skleníkových plynů na vznik ozonové díry cca 30×škodlivější.
  - v současnosti projednávána vyhláška o zákazu ukládání odpadů s obsahem biodegradabilních látek > 5 % (kal) [24], pokud dojde k jejímu přijetí, bude to znamenat zásadní změny v nakládání s kaly s orientací na termické metody
  - Ukládání kalu na skládky je podle vyhlášky číslo 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady zakázáno, pokud není skládka vybavena bioplynovou stanicí (v připravované samostatné vyhlášce o skládkování půjde o úplný zákaz ukládání tohoto typu odpadu na jakoukoli skládku) [26].
  - povinnost vybudovat v obcích s více jak 2000 ekvivalentními obyvateli (EO) dvoustupňovou, mechanicko-biologickou ČOV (implementace směrnice EU 91/71/EEC). Z tohoto důvodu lze předpokládat nárůst množství čištěných odpadních vod a tím i nárůst množství kalů.

V současné době se kaly z komunálních ČOV v České republice nespalují. Spalovny průmyslových kalů jsou však u nás již provozovány. Jednou z nich je např. spalovna ve firmě Biocel Paskov, kde je spalován kal z výroby celulózy. Z dostupných informací se kaly spalují na ČOV Synthesia a spalování kalů probíhá i v celulózce Štětí. Ve stádiu příprav je spalování kalů v Chemopetrolu Litvínov, kde provozní zkoušky proběhly již v minulých letech. Jak již bylo zmíněno, připravuje se však např. termické zpracování kalů z ČOV v Brně či ÚČOV Praha.

V souvislosti s termickým zpracováním kalu se ve většině případů nejedná o jeho pouhé odstranění, ale také o jeho energetické využití. V těchto případech je možné zahrnout kal (druh biomasy) mezi obnovitelné zdroje energie. Ve srovnání s fosilními palivy, kterých jsou pouze omezené zásoby a jejich cena je vysoká, je kal možné označit za poměrně dostupný zdroj energie, ve většině případů spojený se ziskem za jeho likvidaci. Současný stav podílu spotřeby OZE na spotřebě primárních energetických zdrojů se pohybuje kolem 3 %, indikativní cíl (podíl) využití obnovitelných zdrojů v ČR je, jak ukazuje obr. 6, stanoven na 6,8 % v roce 2010 [27] (implementace Směrnice 01/77/EC).

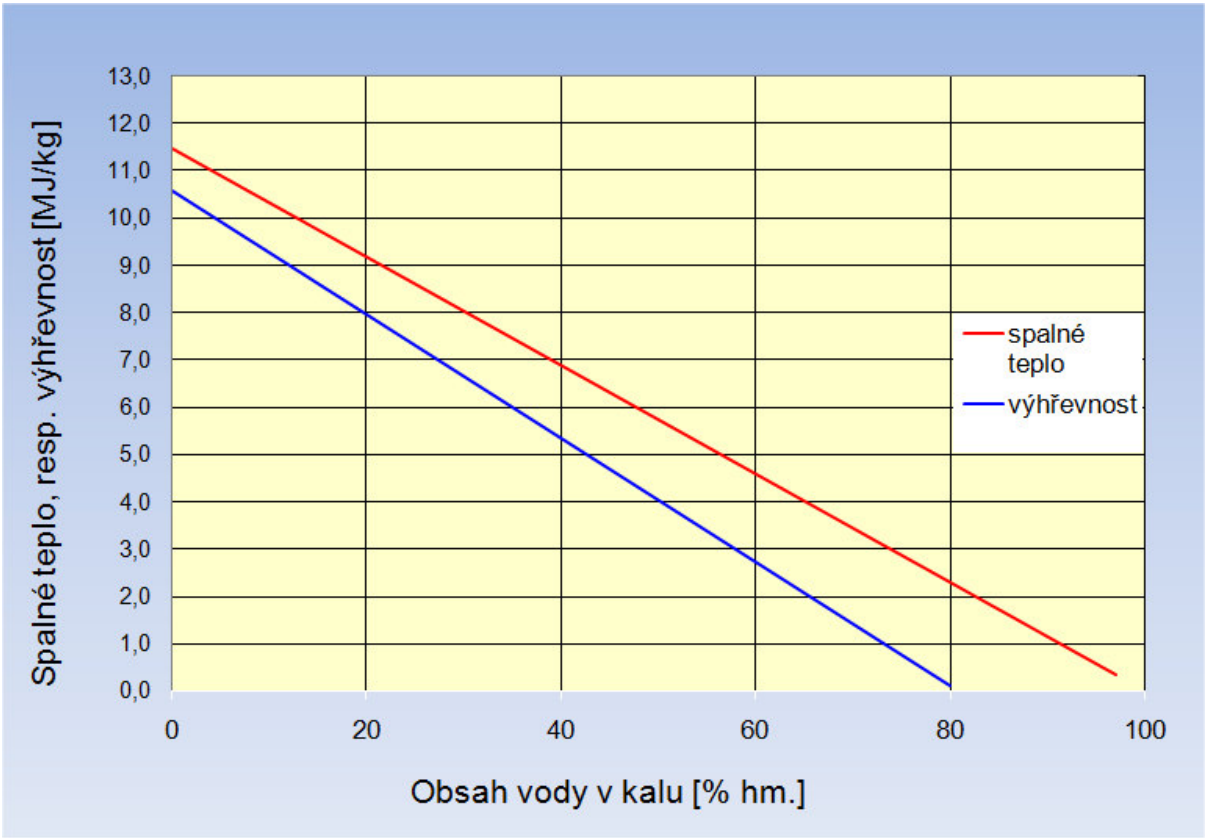
Jsou-li fosilní paliva v různých provozech nahrazována obnovitelnými zdroji energie (jako např. nahrazení uhlí spalováním kalu v cementárně), je dle přijatého Kjótského protokolu [7] možné obchodovat s uspořenými emise a tak přispět i k ekonomické stránce často nákladných způsobů termického zpracování kalu.



Obr. 6 Podíl zdrojů obnovitelných na hrubé spotřebě zdrojů primárních [27]

3.2.2 Vlastnosti kalu jako paliva

Kromě výše uvedených spíše negativních vlastností je možné využít energetického obsahu kalu. Z hlediska využití kalu jakožto paliva je jeho základní vlastností výhřevnost. Ta je odvislá především od obsahu sušiny a hořlavých látek. Kal odvodněný na odstředivkách nebo pásových lisech dosahuje hodnoty sušiny přibližně 25 až 30 %. Při této hodnotě sušiny hoří jen velmi špatně, a z toho důvodu bývá spalován s látkami s vyšším kalorickým obsahem (uhlí, komunální odpad), předsoušen nebo spalován s podpůrným palivem (zemním plynem). Často se uvádí, že kal má podobné složení i výhřevnost hnědému uhlí. Surový kal obsahuje přibližně 60 až 70 % organických látek a vysušený dosahuje výhřevnosti 14 až 20 MJ/kg [12], [28]. Vyhnilý kal obsahuje nižší podíl organické hmoty, a proto je i jeho výhřevnost nižší, hodnoty se pohybují v rozmezí 7,8 až 12,8 MJ/kg [29], [30]. Následující graf 3 zobrazuje závislost výhřevnosti a spalného tepla vyhnilého kalu na obsahu vody. Závislost byla stanovena na základě znalosti přepočtových vztahů mezi spalným teplem a výhřevností, bilance a palivových vlastností vyhnilého kalu uvedených v následující tab. 4.



Graf 3 Kalorický obsah vyhnilého kalu

V tab. 4 je uveden příklad elementárního složení a palivových údajů vysušeného vyhnilého kalu [31]. Z tabulky je patrné, že popel tvoří nemalý podíl, téměř ½, veškerých látek.

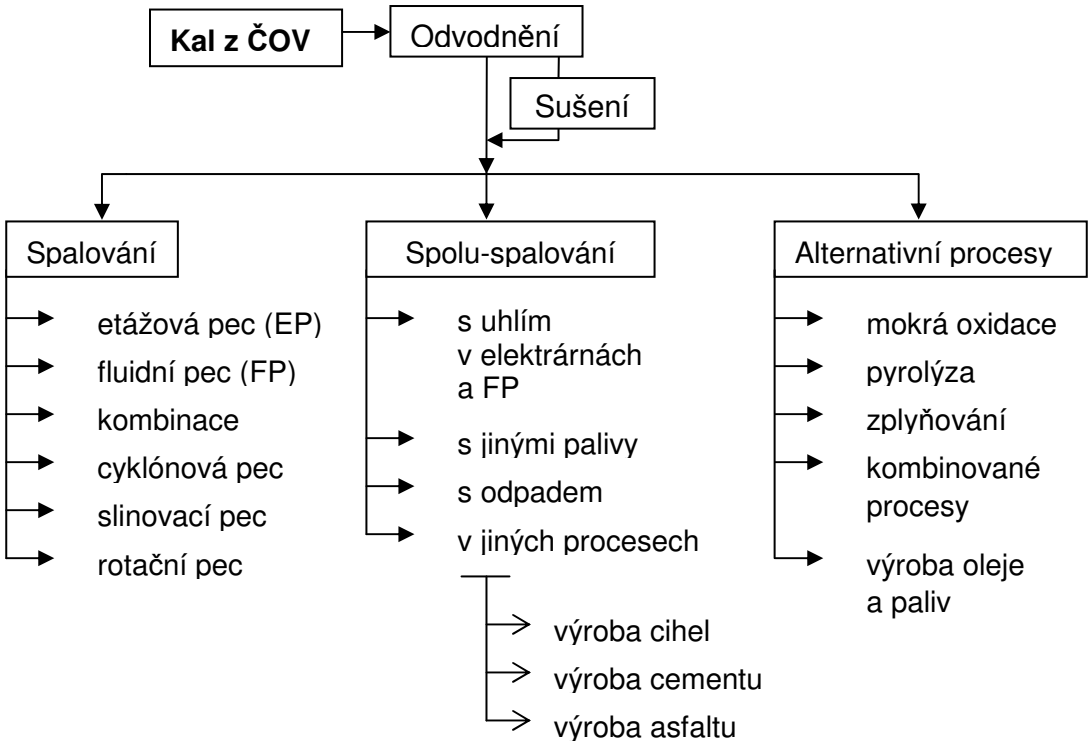
Popel	%	49,92
Hořlavina	%	50,08
Síra veškerá	%	1,38
Síra síranová	%	0,19
Síra pyritová	%	0,04
Spalné teplo	MJ/kg	11,46
Výhřevnost	MJ/kg	10,66
Prchavá hořlavina	%	43,74
Neprchavý zbytek	%	6,35

Elementární rozbor hořlaviny		
H	%	7,37
C	%	53,7
S (organická)	%	2,32
N	%	6,79
O	%	29,82

Tab. 4 Elementární složení a palivové vlastnosti vysušeného, vyhnilého kalu [31]

3.2.3 Termické způsoby zpracování kalů

Termické způsoby zpracování kalů můžeme rozdělit do tří hlavních skupin, jak je patrné z následujícího schématu (obr. 7, [12]). Nejpoužívanější metody jsou shrnuty v následujících kapitolách, blíže je pak popsáno spalování kalu v peci fluidní, etážové (resp. jejich kombinaci) a tzv. „spolu-spalování“ kalu v cementárnách.

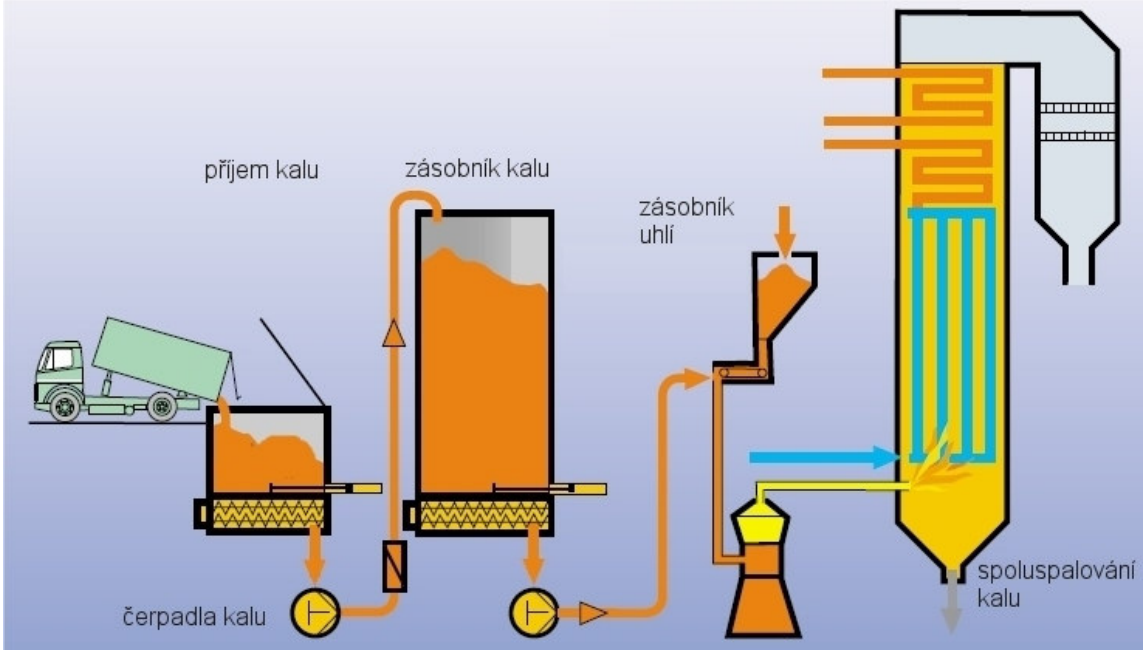


Obr. 7 Různé způsoby termického zpracování kalů [12]

Obecně je možné říci, že při všech metodách termického zpracování kalů dochází ke značné redukci jeho objemu, ve většině případů je využit energetický potenciál a dále dochází ke zničení všech patogenních mikroorganismů. Negativní stránka zápachu kalů, může být řešena odsáváním vzdušiny a využitím pro účely spalování.

3.2.4 „Spolu-spalování“ kalů v teplárnách a elektrárnách

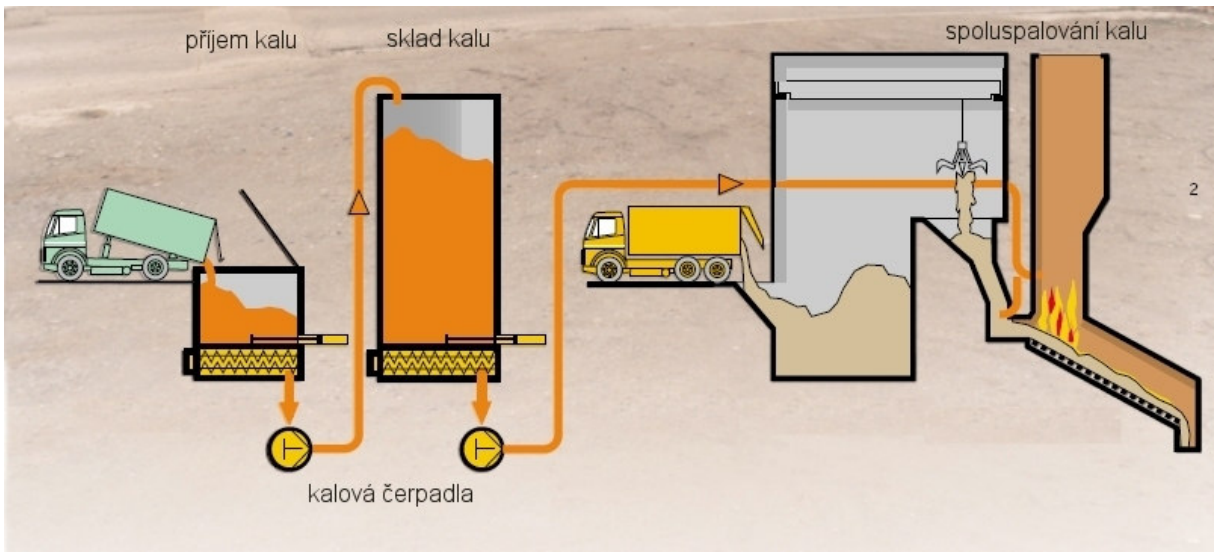
Výhodou této metody je bezesporu nízká investiční náročnost [32] (=investice do zařízení pro meziuložení, přepravu a dávkování kalu do kotle). Jednoduché schema zpracování kalu znázorňuje níže uvedený obr. 8 [33]. Kal postačuje odvodnit v čistírně na obsah sušiny cca 25 % a není již potřeba v místě termického zpracování budovat zařízení pro jeho odvodnění, sušení či granulování. Kal se přidává do uhlí před mletím a směs je předsoušena odpadním teplem z horkých spalin [34]. Množství přidaného odvodněného kalu se obvykle pohybuje od cca 1 do max. 5% spotřeby uhlí, kdy takto malý přídavek nesníží teplotu hoření a nejsou podstatnou měrou ovlivněny produkty spalování [35]. Problém může nastat při vysokém obsahu rtuti, dále také může dojít k zhoršení kvality popílku (při použití vápencové vypírky), neboť vápencová suspenze (po filtraci energosádrovec) jsou materiály, kde se mají škodliviny z kalů zachytit [36]. Tyto obavy byly potvrzeny při spalovacích zkouškách odvodněného vyhnilého kalu z ÚČOV Praha v elektrárně Mělník, kde byly významně překročeny hodnoty škodlivin v popílku i energosádrovci, které byly následně klasifikovány jako nebezpečný odpad. Řádově byly také zvýšeny a překročeny hodnoty emisních limitů (např. PCDD/ F) [37].



Obr. 8 Spolu-spalování čistírenského kalu v kotlích elektráren [33]

3.2.5 Spalování kalů ve spalovnách komunálního odpadu (SKO)

Obdobným způsobem jako v případě tepláren a elektráren lze v některých případech zpracovávat kal i v spalovnách komunálního odpadu, viz obr. 9 [33]. I zde nejsou investičních náklady vysoké, výhodou je existující, většinou moderní systém čistění spalin. Uvádí se však [38], že přidání odvodněného kalu o cca 20% sušině do pece spalovny odpadů může narušit jak vlastní proces hoření odpadu, tak čistění spalin. Z tohoto důvodu se doporučuje [12] kal předsušit na obsah sušiny 55 – 65 % (podobný obsahu sušiny v odpadu) např. využitím páry vygenerované při spalování odpadu. Je-li kal zcela vysušený, je nutné ho nejdříve pečlivě promíchat s odpadem, aby se zabránilo nebezpečí výbuchu, nebo je možné jej v rozemletém stavu přivádět jako suspenzi ve spalovacím vzduchu do práškového hořáku umístněného nad spalovacím roštem. Kal je možné přivádět do pece i v tekutém stavu (zahuštěný), což představuje redukci nákladů na odvodnění či sušení (vhodné při malé vzdálenosti od ČOV), maximálně však v hmotnostním poměru k odpadu 1:4. Je možné jej přivádět pod tlakem přímo do prostoru pece, či na výstup spalin ze spalovací komory. Kal lze však spalovat i v odvodněném stavu ve směsi s odpadem ve fluidních spalovnách odpadu [39] (např. kal z vídeňské ČOV). Kal je po předehřátí odvodněn a pístovými čerpadly dopraven do prostoru pece, kde hoří spolu s komunálním odpadem. Proces je navržen tak, že podíl spalovaných kalů může tvořit až 80 % hm., aniž by bylo třeba přídavného paliva.



Obr. 9 Spolu-spalování čistírenského kalu ve spalovnách komunálního odpadu [33]

3.2.6 Speciální spalovny odvodněného kalu

Dominantní postavení v přímém spalování kalu představují fluidní a etážové pece [12], jsou však používány i jiné typy např. rotační, cyklónové a různé typy slinovacích pecí.

Zkušenosti s fluidním spalováním kalu jsou popsány např. v [40]. V tomto nejčastěji používaném typu pecí pro spalování kalu je fluidní lože tvořeno křemičitým pískem. Ten po zahřátí představuje bohatý rezervoár tepla, zajišťujícího poměrně vysokou stabilitu procesu. Expanze pískového lože je realizována proudem vháněného vzduchu, který bývá předehříván spalinami odcházejícími z procesu. Do pískového fluidního lože je postupně čerpán odvodněný kal, který se zde suší v důsledku vysoké teploty písku a rovněž se dezintegruje působením turbulence pískového lože. Dále zde dochází k uvolnění těkavých látek, které rychle dosahují zápalné teploty a hoří. Postupně tak dochází k pyrolýze usušeného kalu a tím i ke spálení celého organického podílu kalu. Lehčí organický podíl odchází ve spalinách, zatímco případný těžší podíl a větší, nespalitelné inertní kusy propadají skrz fluidní pískové lože a jsou odstraňovány ze dna spalovny. Dle složení kalu je možné použít suchou, polosuchou či mokrou metodu čistění spalin [40].

V případě spalování kalu v etážové (vertikální válcové) peci je kal nejdříve dávkován na vrchní patra a za současného vysoušení odcházejícími spalinami je postupně přesouván do spodní části pece. Ve spodních patrech je kal vysušený a hoří. Vzduch je přiváděn ze dvou důvodů – pro přívod kyslíku potřebného pro spalování a pro regulaci teploty procesu, která musí být udržována nad teplotou 600 ºC, aby došlo k dokonalému vyhoření prchavých látek [21]. Často se u těchto spaloven objevují problémy se zápachem z horních vrstev kalu, který setrvává i za sekundárními hořáky. Přídavné palivo je potřebné při najíždění spalovny a pro zajištění požadované teploty.

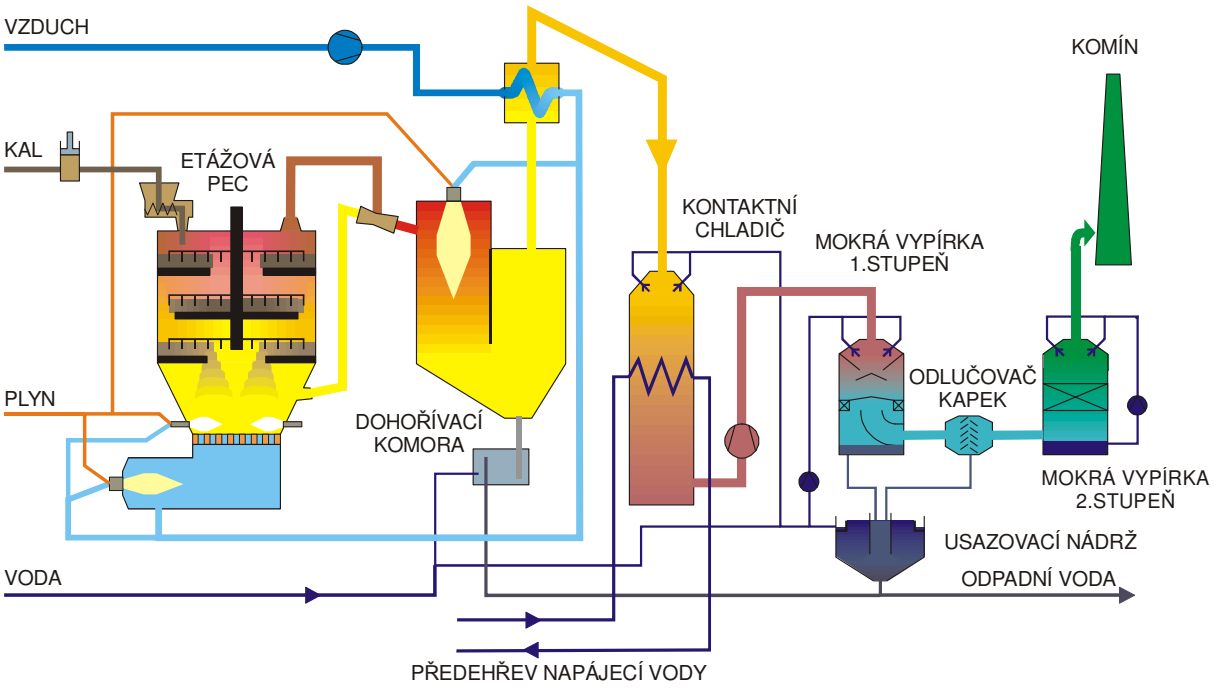
V průmyslové praxi se také často používá fluidní pec kombinovaná s etážovou sušárnou. Jako příklad je možné zmínit jednu z největších spaloven průmyslových kalů v ČR vystavěnou v podniku zabývajícího se výrobou celulózy a krmného droždí. Při této výrobě vzniká přibližně 100 t čistírenských kalů za den.

Zmíněná technologie spalovny s fluidním ložem a etážovou sušárnou kalu je znázorněna na obr. 10 [41]. Kal je nejdříve odvodněn a následným zpracováním v kalolisech je zbaven vody natolik, že je soudržný, s charakterem pastovité hmoty. Po tomto prvotním zpracování je dopraven do zásobníku kalu, ze kterého je dávkován objemovým čerpadlem do etážové pece. Před vstupem do pece prochází kal rozdružovačem, ve kterém je rozdroben na menší části. K tomu dochází z důvodu lepšího průběhu sušení. Rozdružovač kal dávkuje na první patro, kde je při postupném sušení procházejícími spalinami, shrnován oběžnými lopatkami na další patra. Lopatky jsou upevněny na hřídeli, která je z důvodu vysoké teploty v rotační etážové peci chlazená vzduchem a to z vnitřní části (je dutá). Z poslední etáže padá vysušený kal do fluidní vrstvy, kde probíhá jeho spalování. Etážová pec se ukázala jako nejvhodnější zařízení pro kombinaci sušení a spalování kalu. Netvoří se v ní

nežádoucí nálepy kalu na stěnách, jako je tomu v případě použití komorových, nebo klasických typů rotačních pecí.

Vzniklé spaliny vstupují do dohořívací komory, která je součástí systému pro snížení obsahu nežádoucích složek v emisích. Do komory ústí spaliny tangenciálně, kde při teplotě 900 °C s dobou zdržení stanovenou zákonem (min. 1 s) probíhá konverze CO na CO_2, potřebná ke snížení obsahu CO ve spalinách ($CO + ½ O_2 \rightarrow CO_2$). Podobně konvertují i nespálené uhlovodíky. Komora umožňuje svým tvarem narážení těžších mechanických částic na stěnu a jejich následný odvod přes vodní uzávěr. Vše se děje za podtlaku, který zajišťuje ventilátor spalin. Spaliny vycházející z dohořívací komory se využívají pro předehřívání fluidního a spalovacího vzduchu v rekuperačním výměníku a k předehřátí demineralizované vody, určené na výrobu páry.

Ochlazené spaliny pak procházejí pračkou kouřových plynů, kde se po nástřiku vody a chemikálií vypírá část nečistot. Znečištěná vypírací voda odchází do usazováku, odkud se jí část jako recyklát vrací nazpět. Dále prochází spaliny kapalinovým odlučovačem a odlučovačem tuhých látek. V odlučovači tuhých látek se ještě přidává NaOH k neutralizaci kyselých složek jako je např. SO_2. Nezreagovaný NaOH se využije k neutralizaci spalin v pračce kouřových plynů. Z odlučovače tuhých látek již odcházejí spaliny do komína.



Obr. 10 Spalovna průmyslových kalů z výroby celulózy [41]

Technologie spalování ve fluidní peci má řadu pozitiv [12] jako:

- velmi dobré promíchání kalu a písku, dochází k vytvoření velké plochy povrchu a k prakticky dokonalému spalování při poměrně nízkých teplotách a přebytku vzduchu
- dostatečná doba zdržení kalu pro vyhoření
- volný objem komory (nad fluidním ložem) slouží jako dohořívací (sekundární spalovací) komora, kde dochází ke kompletní destrukci organických látek
- stabilita spalovacího procesu – velká zásoba horkého materiálu inertního lože působí jako setrvačník zabraňující náhlým změnám teploty (např. při změnách ve složení kalu)
- rychlé a plynulé najíždění a odstavování

Přes všechny uvedené klady této technologie je důležité upozornit na tyto uváděné aspekty provozu:

- při 20 až 30% obsahu sušiny v kalu ještě není zaručeno autarkní spalování - záleží na výhřevnosti (obsahu vody a spalitelných látek). Může tedy nastat potřeba použití přídavného paliva (zemní plyn) pro udržení podmínek spalování.
- 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 čistění 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.

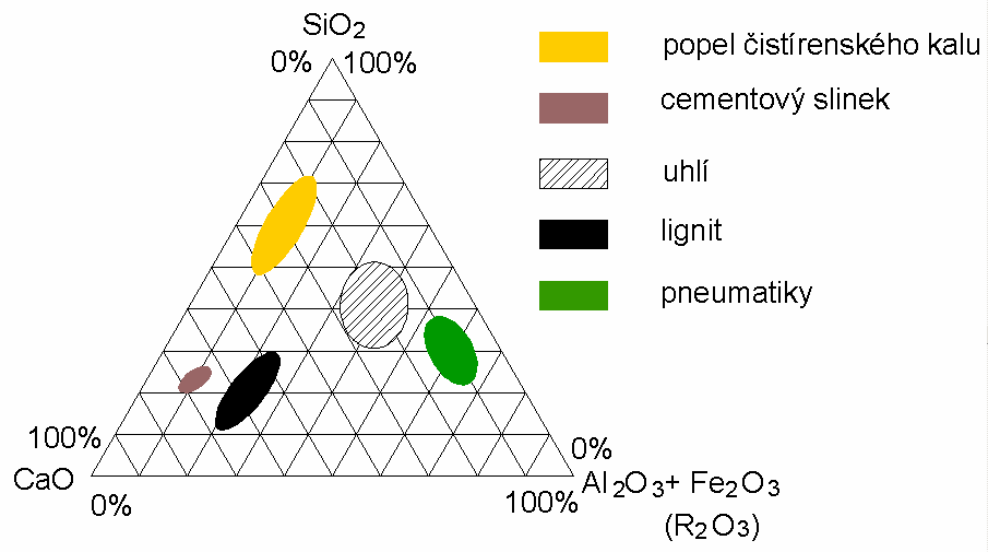
3.2.7 „Spolu-spalování“ usušeného kalu v cementárnách

Ze zkušeností se po zpracování kalů v zemědělství jeví „spolu-spalování“ kalů v rotačních pecích cementáren jako ekologicky nejvhodnější technologií [43] pro využití a zpracování kalů. Při využití odpadního tepla pro sušení kalů, jak ukazuje dále tato práce, může být tento způsob zpracování též ekonomicky zajímavým řešením. 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), především na vodní páru a oxid uhličitý.
- Měřené emisní limity při experimentech v ČR byly v souladu s platnou legislativou (např. emise TK a tuhých znečisťujících látek (TZL) 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 CO_2. Ve prospěch snížení emisí CO_2 hovoří částečně rostlinný původ kalu (rostliny spotřebovávají CO_2 při fotosyntéze a vylepšují tedy bilanci po spálení kalu).
- 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) [44].
- Jednoduchá aplikace do pece - vysušený kal (cca 90 % sušiny) je možné smíchat s černým uhlím a spalovat v hlavním hořáku rotační pece, dále může být dávkován spolu s dalšími tuhými alternativními palivy pomocí upravených hořáků či trysek nebo dávkován do patního kusu rotační pece.
- Jedná se o bezodpadovou technologii, při které zároveň dochází k částečné úspoře suroviny pro výpal slinku díky obdobnému složení (viz tab. 5 [31] a obr. 11 [45]). Podle kvality, může 1 tuna sušených kalů nahradit až 1/3 tuny vstupní suroviny.

Složení popelu [%]	
SiO_2	39,11
Al_2O_3	13,84
Fe_2O_3	13,2
CaO	20,26
MgO	2,53
SO_3	11,06

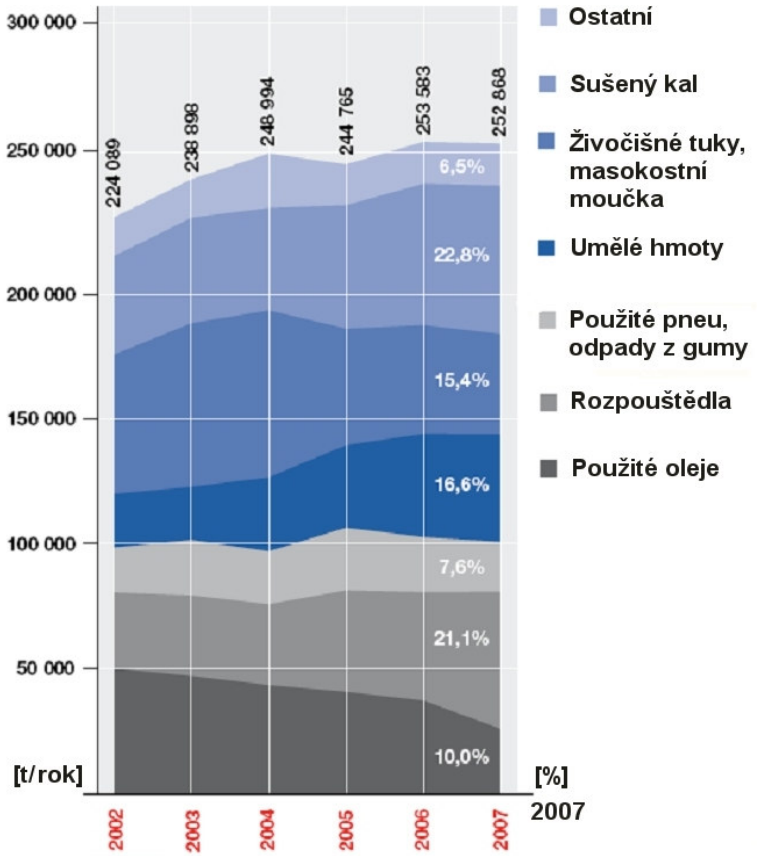
Tab. 5 Materiálové složení popelu čistírenského kalu [31]



Obr. 11 Složení popelu čistírenského kalu a slinku v ternárním diagramu [45]

- Většina těžkých kovů (TK) 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 nejproblematičtější látky patří těkavé prvky, jako je rtuť a thalium. Průběh odpařování rtuti z kalu je podrobně věnována práce [15]. Ze sledování obsahu rtuti v cementárně vyplývá [37], že rtuť ve formě chloridů se v rotační peci z velké části odpařuje, prochází systémem předehřevu 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 dale 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.

- Snaha o využití alternativních paliv, včetně kalů, patří do hlavního programu úspory energií v cementárnách. Např. v Německu nebo ve Francii již některé závody nahradily spalováním alternativních paliv 65 až 75 % fosilních paliv. Podobná situace je i ve švýcarských cementárnách, ve kterých bývá 40 až 50 % tepla pro výpal slinku zajištěno alternativními palivy, z nichž sušené čistírenské kaly tvořili v roce 2007 cca 22,8 % hm. (viz obr. 12, [45]).



Obr. 12 Podíl sušených kalů na skladbě alternativních paliv švýcarských cementáren [45]

parametr	jednotka	spalovna	cementárna
TZL- tuhé znečišťující látky	mg/m^3	10	30
CO		50	50
organické látky v plynné fázi vyjádřené celkovým obsahem organického uhlíku		10	10
plynné sloučeniny chloru vyjádřené jako HCl		10	10
plynné sloučeniny fluoru vyjádřené jako HF		1	1
SO_2		50	50
NO_2 spalovny nad 6 t/h a nové spalovny / do 6 t/h		200/400	-
NOx nová zařízení / stávající zařízení		-	500(1)/800
Cd+Tl		0,05	0,05
Hg		0,05	0,05
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V		0,5	0,5
dioxiny+furany	ng TE/m^3	0,1	0,1

Tab. 6 Srovnání požadavků na emise do ovzduší ze spaloven a cementáren, nařízení vlády č. 354/2002 Sb., implementace směrnice 2000/76/EC

(1) cementárny, které začaly spoluspalovat odpad do 28. 12. 2004, se považují za stávající zařízení

Pozn.: emisní limity se vztahují na standardní podmínky - teplota 273,15 K a tlak 101,32 kPa, referenční obsah kyslíku 10 % a suchý plyn pro cementárny, pro spalovnu odpadů, pro spalování tuhého odpadu je referenční obsah kyslíku 11%.

Hlavní důvody úpravy čistírenských kalů pro použití v cementárně

Jak již bylo zmíněno, stabilizovaný čistírenský kal obsahuje velké procento vody (70 – 80 %), v závislosti na stupni odvodnění. Tento nemalý podíl vody je pro výpal v cementářské peci se suchou technologií výpalu zcela nevhodný z následujících důvodů:

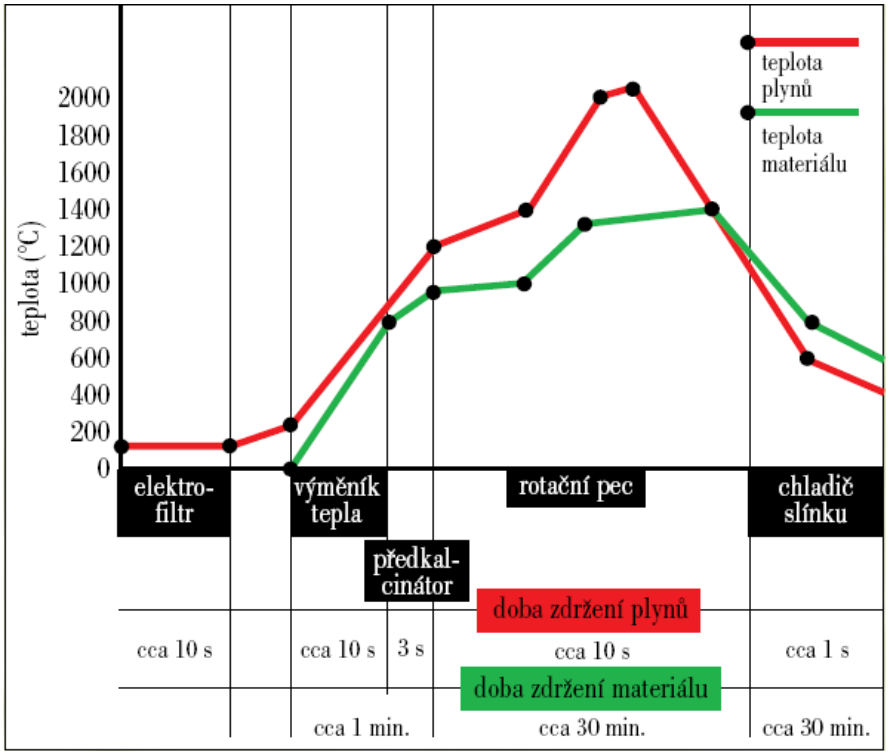
- Při dávkování kalu s vysokým obsahem vody by došlo k odpaření tohoto velkého objemu vody, které by vedlo k poklesu teplot, které jsou v cementářské technologii nezbytné pro tvorbu slínkových materiálů. Snížení teplot by tedy také mohlo vést ke zhoršení kvality produktu.
- Vlivem velkého zvětšení objemu spalin, vlivem odpaření vody z kalu by též došlo k velkému odvodu tepla zvýšeným objemem spalin
- Díky velkému množství odpařené vody by došlo k vysokému nárůstu objemu kouřových plynů, které by stávající ventilátory nemusely kapacitně zvládnout.

Z výše uvedených hlavních technologických důvodů nelze při suchém způsobu výroby cementu vůbec uvažovat o dávkování většího množství pouze odvodněných, dále neupravených kalů. Proto je nutno kal před použitím v cementárně dále upravit. Úprava tedy spočívá zejména ve zbavení kalu přebytečné vody.

Zmíněný způsob dávkování odvodněných kalů by přicházel v úvahu v případě „mokrého“ způsobu výroby cementu, který však zejména kvůli vyšším energetickým nárokům není již běžným způsobem výroby cementu. V ČR byla poslední mokrá rotační pec zastavena k 1. 1. 1998 [46].

4 CEMENTÁRNA JAKO POTENCIÁLNÍ MÍSTO PRO SUŠENÍ KALŮ

Cementárna je místo, kde za vysokých teplot dochází tzv. kalcinací k přeměně vápence a korekčních složek na slinek a oxid uhličitý. Proces je značně energeticky náročný, měrná spotřeba energie se může pohybovat okolo 3,4 GJ/ t vyrobeného slinku. Množství spalin je tedy, i při snaze provozu spalovacího procesu s nízkým přebytek vzduchu, značné. Nejen z těchto důvodů disponují často cementárny potenciálem pro odběr tepla, který je s výhodou možné využít např. pro sušení kalů. Průběh teplot plynů a materiálu podél technologie výroby cementu je zachycen na následujícím obrázku.



Obr. 13 Průběh teplot plynů a materiálu v technologii výpalu slinku [47]

V technologii výpalu slinku je možné uvažovat o více místech s tepelným potenciálem, který přichází v úvahu pro sušení kalů. Jedním z nich je místo chlazení slinku na roštovém chladiči, kde dochází ke chlazení slinku proudícím vzduchem (obr. 14, aparát 11). Vzduch po ochlazení slinku má poměrně velký tepelný potenciál, je však značně zaprášený prachovými částicemi slinku a tudíž silně abrazivní. Především z tohoto důvodu nebylo toto místo pro využití tepla dále uvažováno. Mezi dalšími můžeme zmínit větve spalin jdoucí do stabilizátorů a je-li, pak i halogenový by-pass.

4.1 TEPELNÝ POTENCIÁL POTŘEBNÝ PRO SUŠENÍ KALU

Za účelem získání představy o potenciálu kalu v 50km okolí cementárny a tedy i možnosti prověření technicko-ekonomické realizovatelnosti projektu byla ústavem Procesního a ekologického inženýrství v průběhu roku 2002 zorganizována dotazníková akce vedoucí ke zmapování zpracování kalů z ČOV z této oblasti a zpracována databáze potřebných informací. Jednalo se zejména o zjištění zájmu o potenciální spolupráci a hodnot týkajících se produkce a zpracování kalu jako: množství kalu, obsah sušiny a cena za jeho likvidaci apod.

Z třicetišesti čistíren odpadních vod, které požadované informace poskytly, bylo vybráno 20 vhodných čistíren (viz příloha 1), především s vyšším obsahem sušiny v kalu a vyšší celkovou produkcí kalu. Celkové množství sušiny kalu těchto vybraných čistíren je cca 9 kt/ rok, průměrná sušina kalu po odvodnění se pohybuje okolo 22 %.

S využitím takto získaných informací byl na základě tepelné bilance procesu sušení kalu stanoven minimální potřebný potenciál tepla pro vysušení kalu. Entalpická bilance sušení kalu je založená na vstupních parametrech kalu, které jsou shrnuty v následující tab. 7.

Parametry vstupního kalu		
parametr	jednotka	hodnota
množství vlhkého kalu	t/h	5,14
množství sušiny v kalu	kg/h	1080
vstupní obsah vody v kalu	%	79
vstupní obsah sušiny v kalu	%	21
množství vody ve vlhkém kalu	kg/h	4063
množství vody k odpaření	kg/h	3943
Parametry výstupního kalu		
parametr	jednotka	hodnota
množství vysušeného kalu	t/h	1,2
množství vody ve vysušeném kalu	kg/h	120
obsah sušiny	%	90
obsah zbytkové vody v kalu	%	10

Tab. 7 Vstupní parametry kalu

Jak ukazuje následující tab. 8, pro vysušení potřebného množství kalu na požadovanou hodnotu sušiny 90 % je zapotřebí přibližně 3 MW tepelného výkonu.

parametr	jednotka	hodnota
entalpie H_2O na vstupu (20°C)	kJ/kg	84
entalpie H_2O na výstupu (100°C)	kJ/kg	2676
teplo pro odpar a ohřev 1 kg H_2O	kJ/kg	2592
teplo pro odpar a ohřev H_2O	GJ/h	10,26
množství sušiny v kalu	kg/h	1080
měrné teplo sušiny	kJ/kg.K	1,157
teplo na ohřev sušiny (nevýznamné)	GJ/h	0,10
celková dodávka tepla kalu v sušárně	GJ/h	10,36
	MW	2,88
celkové tepelné ztráty (odhad)	%	4
teplo odebrané spalinám ve výměníku	GJ/h	10,78
	MW	2,99

Tab. 8 Určení potřebného tepelného potenciálu

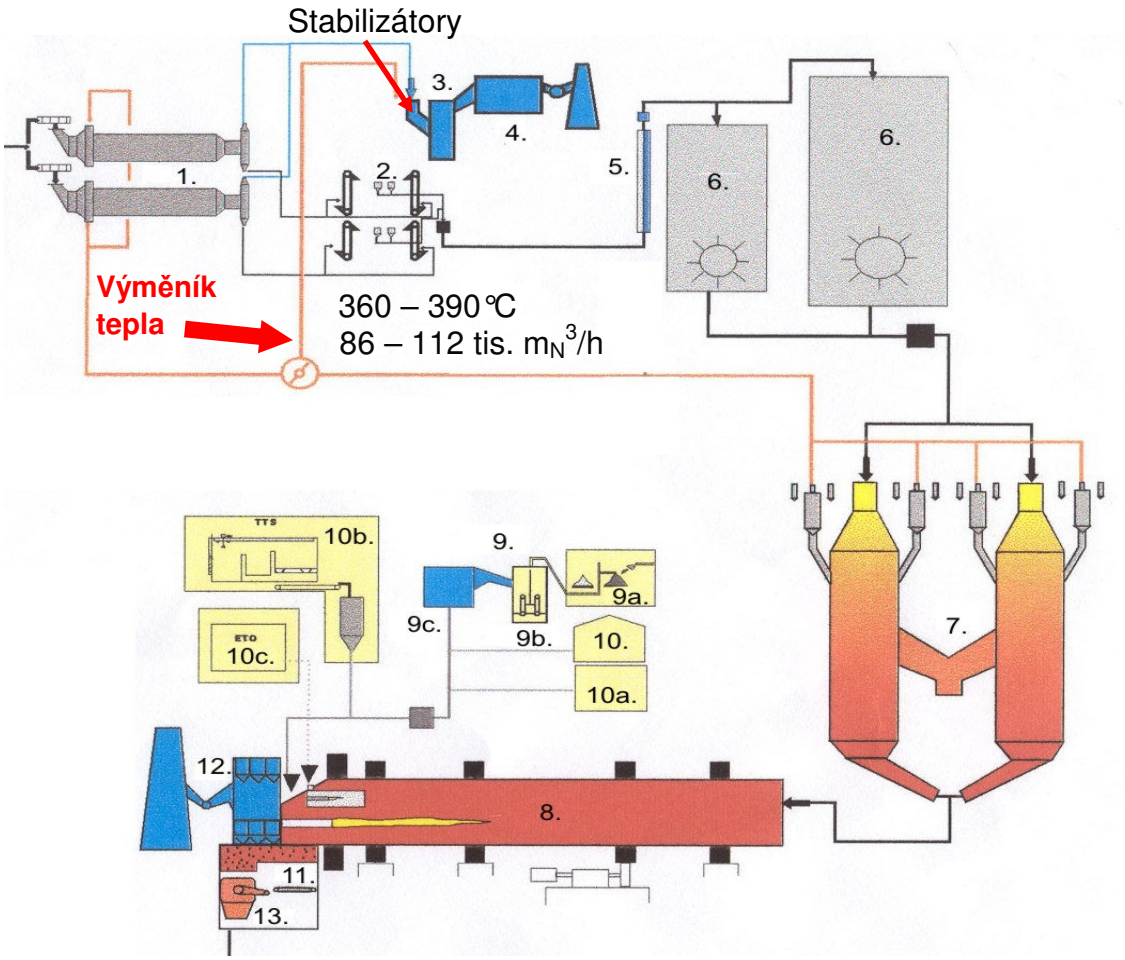
Entalpie vody na vstupu a výstupu ze sušárny byla určena z parních tabulek (využitím programu Steam Tables) pro danou teplotu a atmosférický tlak. Měrné teplo sušiny kalu bylo zjištěno z [48].

4.2 VYUŽITELNÝ TEPELNÝ POTENCIÁL SPALIN

Hodnoty pro určení tepelné energie byly získány z komplexního měření linky výpalu slinku této cementárny [49].

Jak bylo zmíněno v kapitole 4 , v cementárně se nachází více potenciálních míst pro odběr tepla, avšak ne se stejnými podmínkami. Na následující obr. 14 je označeno vybrané potenciální místo odběru tepla, v tomto případě spalinám. Také v tomto místě je možné odvést dostatek tepla, aniž by byl proces výpalu slinku ovlivněn. V obrázku jsou zaznamenány orientační hodnoty průtoků spalin a jejich teplota.

Spaliny jsou ve stabilizátoru (viz obr. 14, aparát 3) ochlazovány proudem rozprašované vody. Zároveň zde vlivem kontaktu s vodou dochází k částečnému odloučení prachových částic, ještě než spaliny vyústí do odlučovačů prachových částic (elektroodlučovač či hadicové filtry). Z tohoto důvodu, aby byla zachována čistící funkce stabilizátorů a aby teplota za stabilizátory nebyla příliš nízká, bylo uvažováno se snížením teploty spalin před stabilizátory z 363 až 387°C na max. 270°C. Pokud tedy využijeme tento teplotní gradient, získáme minimálně 3,19 MW, jak ukazují dále uvedená tab. 9 a obr. 15. Porovnáním s potřebným tepelným tokem pro vysušení kalu (viz tab. 8) zjistíme, že tento tepelný tok je postačující.



1. Surovinové mlýny
2. Větrné třídiče
3. Stabilizátory
4. Elektrofiltry
5. Fluidní doprava
6. Homogenizační sila
7. Protiproudý šachtový výměník
8. Rotační pec
9. Manipulace a doprava uhlí
9a. Kruhová skládka uhlí
9b. Vertikální uhelný mlýn
9c. Filtr firmy Beth
10. Manipulace a doprava zemní plyn
10a. Manipulace mazut
10b. Manipulace tuhá alternativní paliva
10c. Manipulace tekutá alternativní paliva
11. Roštový chladič
12. Hadicový filtr
13. Kladivový drtič slinku

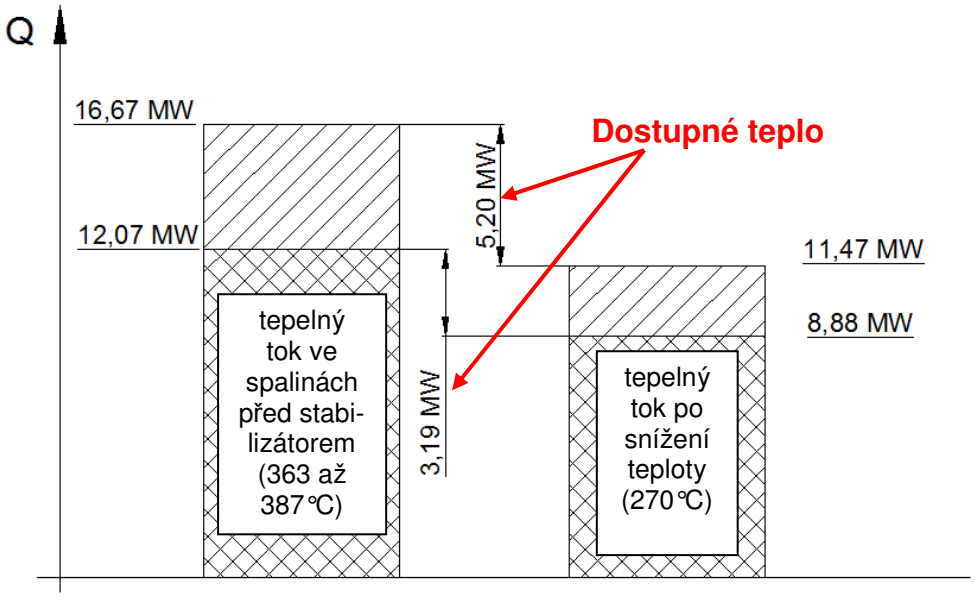
Obr. 14 Schema cementárny s místem možného odběru tepla pro sušení kalů

Na zjednodušeném obr. 14 je patrná pouze jedna větev spalin vedoucí do surovinových mlýnů. Ve skutečnosti však spaliny odcházejí ze šachtových výměníků dvěma větvemi. Na každé je odbočka pro předehřev suroviny, na jedné z nich navíc odbočka k předehřevu uhlí v uhelné mlýnici, jak je zobrazeno i na strojně technologickém schematu, viz příloha 2. Pro vytápění sušárny dostačuje teplo z jedné větve, jak je popsáno dále. Tento jev je též příznivý z toho důvodu, že v zimním období, období menšího odběru cementu, bývá cementárna v provozu pouze na jeden šachtový výměník a tedy i jednu větev spalin.

parametry spalin větve "a"	jednotka	min.	max.
průtok spalin	10^3 m_N^3/h	86,5	111,7
teplota spalin	℃	363	387
tepelný tok ve spalinách	MW	12,07	16,67
tepelný tok ve spalinách po ochlazení na 270 ℃	MW	8,88	11,47
využitelné teplo ze spalin	MW	3,19	5,20

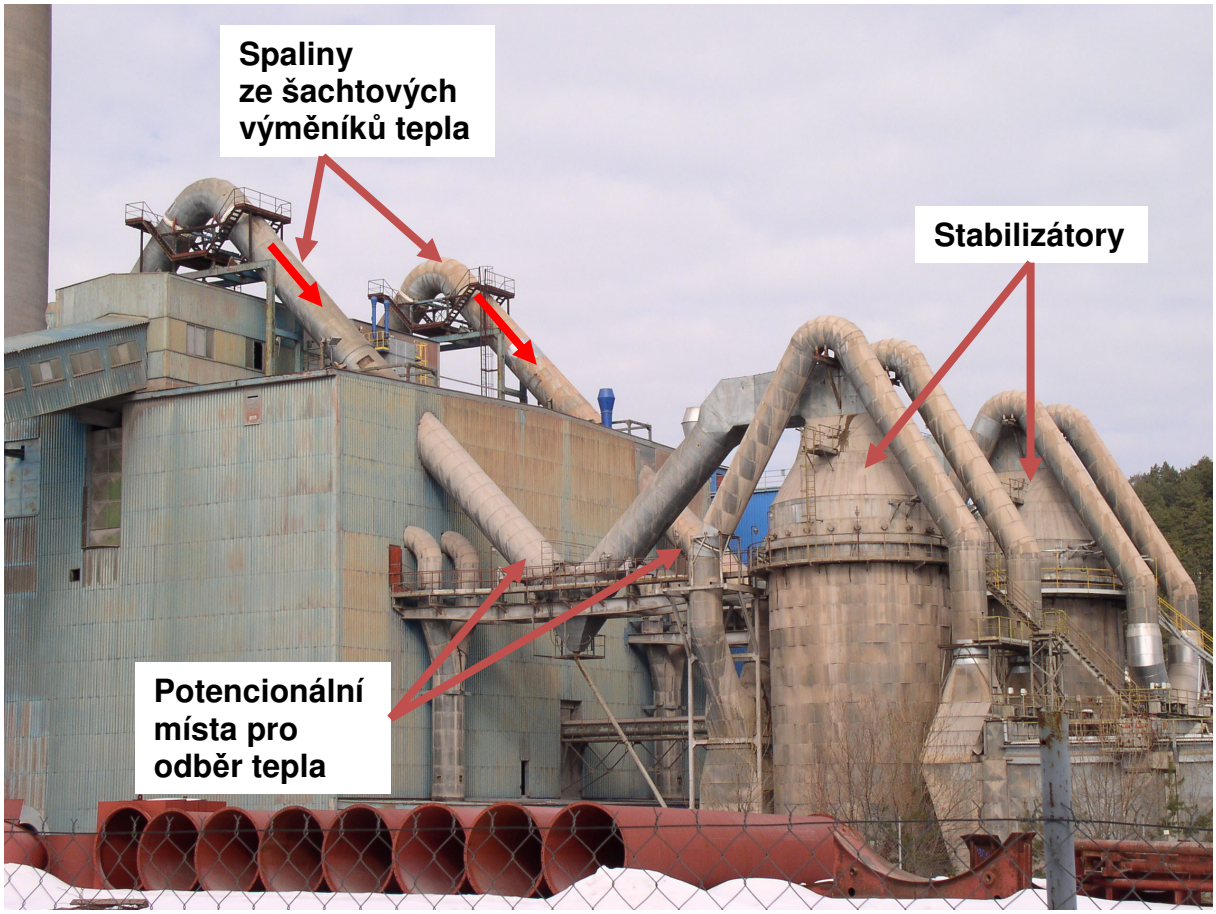
Tab. 9 Využitelný tepelný potenciál spalin na větvi „a“

Maximální využitelný tepelný výkon je 5,20 MW. Graficky je využitelný tepelný potenciál spalin znázorněn na obr. 15. Uvedený minimální a maximální využitelný tepelný tok odpovídají jednotlivým režimům provozu (minimální = provoz rotační pece se surovinovou mlýnicí, maximální = provoz pouze rotační pece - bez předehřevu suroviny) a příslušné větvi spalin. Pokud by byl výměník umístěn na druhé větvi spalin vedoucí do druhého stabilizátoru, vychází hodnota minimálního využitelného tepelného toku ještě o 0,36 MW příznivěji. Hodnoty parametrů spalin pro provedené výpočty byly čerpány z výsledků komplexních měření linky výpalu slinku konkrétní cementárny.



Obr. 15 Využitelný tepelný potenciál spalin

Parametry průtoku, teploty a dostupného tepla jednotlivých režimů provozu pro obě větve spalin viz příloha 3, této práce. Zmíněné větve kouřovodů, ústících do separátních stabilizátorů, je možné též vidět na následujícím obr. 16.



Obr. 16 Potenciální místa pro odběr tepla na dvou potrubních větvích před stabilizátory

5 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.

5.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ SUŠÁREN KALŮ

Sušárny kalů je obecně možné rozdělit do tří hlavních skupin podle toho, jakým způsobem dochází k přenosu tepla, zda přímým či nepřímým stykem sušicího a sušeného média (kalu) následujícím způsobem:

1) Přímo vyhřívané
   - dochází ke styku sušícího a sušeného média
   - nejčastější sušící médium: horký vzduch, spaliny
   - základní typy sušáren: bubnové, fluidní, proudové, vírové, etážové, pásové

2) Nepřímo vyhřívané
   - sušící a sušené médium oddělené stěnou
   - nejčastější sušící médium: horký olej, pára
   - základní typy sušáren: bubnové, diskové, lopatkové, tenko-vrstvé (thin-film dryer)

3) Kombinované sušárny
   - větší podíl přenosu tepla je uskutečňován nepřímo - přes stěnu, zbytek přímým kontaktem sušícího (plynného) média s kalem
   - sušící médium: kombinace médií pro přímo a nepřímo vyhřívané sušárny
   - rotační, fluidní

5.2 ANALÝZA VHODNÉHO TYPU SUŠENÍ KALŮ

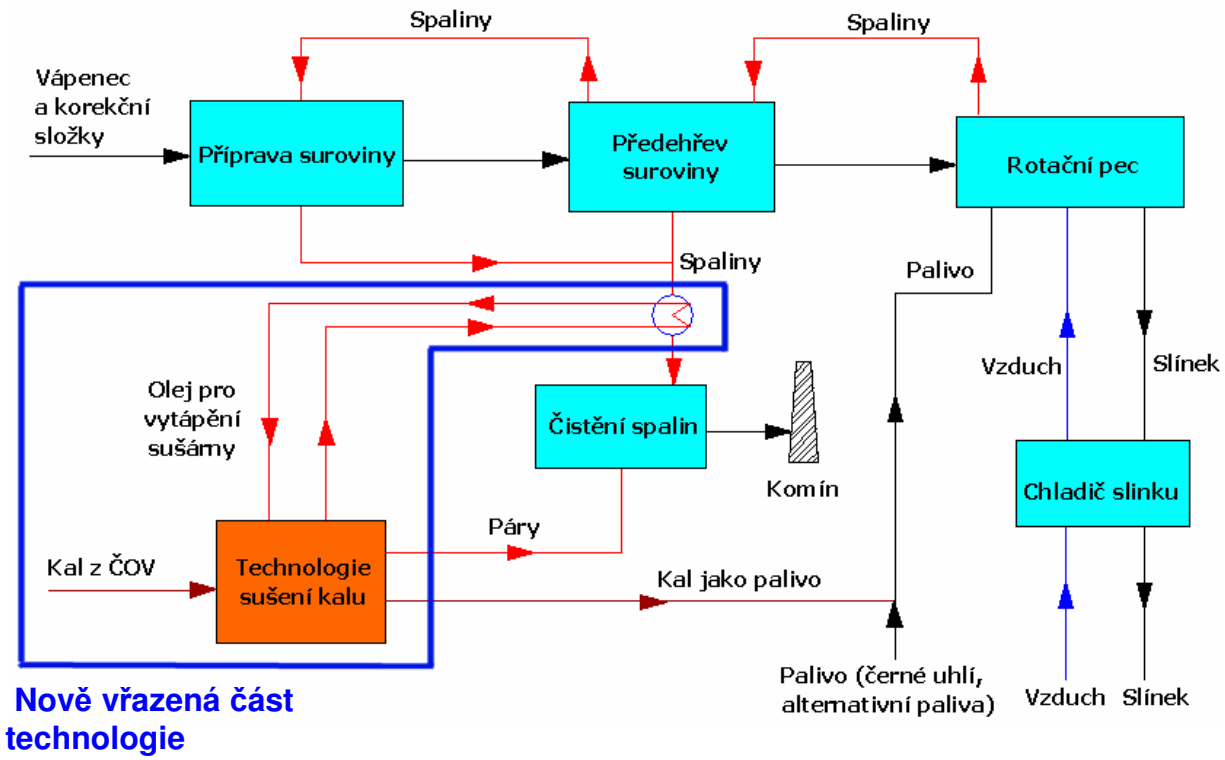
U přímých a kombinovaných sušáren dochází ke kontaktu mezi sušeným a sušicím médiem, kalem. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.1, kal často obsahuje těžké kovy, jako je např. rtuť, thalium a kadmium. Při sušení kalů může docházet k částečnému odpařování těchto těžkých kovů, viz např. odpařování rtuti popsané [15]. Ve zmíněném případě přímých a kombinovaných sušáren by tento fakt znamenal znečištění sušícího média a s velkou pravděpodobností potřebu čištění sušícího média smíchaného s brýdovými parami. V našem případě by tento zmíněný fakt představoval, v případě použití spalin jako sušícího média, znečistění

velkého množství spalin (min.86 tis. Nm^3/h). Potřeba čištění takovéhoto množství spalin a druhu znečistění by pak představovala vyšší nároky na současnou technologii čištění spalin tvořenou prozatím skrápěním ve stabilizátorech a hadicovými filtry. Tyto nároky jsou samozřejmě spojené s nemalými investicemi.

Z těchto důvodu 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 teplonosný 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 teplonosným olejem jako sušícím médiem.

Umístění takovéto jednotky pro zpracování a sušení kalů v cementárně je znázorněno na následujícím blokovém schématu, viz obr. 17.

Jako nejlepší způsob zpracování usušeného kalu se jeví jeho přidávání v uhelné mlýnici, kde je následně s uhlím dopraven do hořáku rotační pece pro výpal slinku a spálen. Hranice nově vřazené části technologie je na obr. 17 znázorněna modrou barvou.



Obr. 17 Blokové schéma umístění jednotky pro zpracování a sušení kalů v cementárně

5.3 PRŮZKUM TRHU SE SUŠÁRNAMI KALŮ V ČR A ZAHRANIČÍ

Jak již bylo řečeno, sušárna je jedním z hlavních a také nejdražších zařízení v navrhované technologii sušení a spalování kalů. Pro vybrání vhodné technologie a také pro zjištění investičních nákladů na toto zařízení byl prozkoumáván trh v ČR i zahraničí.

V České republice má zkušenosti se sušením kalů (pastovitých látek) poměrně málo firem, můžeme jmenovat např. firmu Tesur a VUOS (Výzkumný ústav organických syntéz) v Pardubicích. Ve výzkumném ústavu byla vynalezena pro sušení pastovitých látek (včetně kalu) tzv. vírová sušárna (spin flash dryer), jejíž licenci odkoupila dánská společnost Invenys APV. Vírové sušárny využívají pouze přímého způsobu sušení kalů, a protože jsou také navrhnuty na nižší odpar, než je požadovaný pro tento případ (odpar vody vírových sušáren je do 1 t/h, požadovaných je však cca 4 t/h), nebylo možné s nimi počítat. Obdobně firmy na Slovensku (Lukro, Strojtech) nabízejí pro sušení kalů sušárny s přímým způsobem sušení – proudové.

Z tohoto důvodu byli kontaktováni zahraniční dodavatelé, kteří mají se sušením kalu bohatější zkušenosti.

V přílohách této práce jsou postupně popsány nabídky od několika různých dodavatelů, kteří se liší v mnoha parametrech, nejen v technologii sušení. Z tohoto důvodu je zařazena následující kapitola popisující výběr nejvhodnější nabídnuté technologie. Nabídky byly získány přibližně od poloviny z patnácti oslovených zahraničních firem.

5.4 VÝBĚR TYPU SUŠÁRNY

Jak bylo zmíněné v předchozí kapitole, nabídky sušení kalů, které byly získány od zahraničních dodavatelů, se odlišují v mnoha parametrech. Kromě ceny za různorodé technologie jsou významné rozdíly také ve spotřebě energií, zastavěné ploše, ale také rozsahu dodávky.

Pokud odhlédneme od uváděné ceny za jednotlivé technologie (viz tab. 10), do které je nutné započíst všechny neuvedené náklady mimo rozsah dodávky (viz příloha 4), druhým důležitým parametrem, značně ovlivňujícím zejména provozní náklady je spotřebovaná elektrická energie. Tato hodnota, jak můžeme vidět z následující tabulky, je nezanedbatelná a dle typu technologie se pohybuje v poměrně velkém rozmezí cca 100 až 380 kW.

Dalším technickým parametrem, stojícím za povšimnutí, jsou vstupní a výstupní teplota vyhřívacího média - oleje. Protože zdrojem tepla a jeho parametry ovlivnit nemůžeme, platí, že čím vyšší je teplota termololeje použitá pro sušení, tím nižší je výsledný střední teplotní logaritmický spád výměníku, vyšší potřebná plocha výměny tepla, a tedy i investiční náklady na výměník tepla.

Technologie sušení kalu	Teplota oleje [°C]	Výstupní sušina [%]	Výkon/ příkon [kW]	Rozměry dxšxv [m]/ hmotnost [kg]	Cena [mil. €]
Fluidní sušení CDS 50 - Andritz	230÷250	92	308/ 182	16,5x11,4x17,2/	3,49
Disková sušárna Atlas Stord	180÷200	90	160/	13,4x3,1x3,6/	1,02
Pásová sušárna Dry Rex	200 (vzduch)	95	100÷150/	12x7x6,5/ 10000	0,9
Lopatková sušárna GMF - Gouda	225÷250	>95	200÷250/	14,5÷16,4x4x4/ 90000÷100000	1,89 ÷ 2,173
Tenkovrstvá a lineární suš. Limus	175÷200	92	448/ 365	/132500	2,017
Etážová sušárna Seghers		>90	/ 160	15x13,5x19/	1,6
Tenkovrstvá, vysokootáčková sušárna Vomm	240÷280	90	520/ 380	13x6x2,5/ 84000	3,27

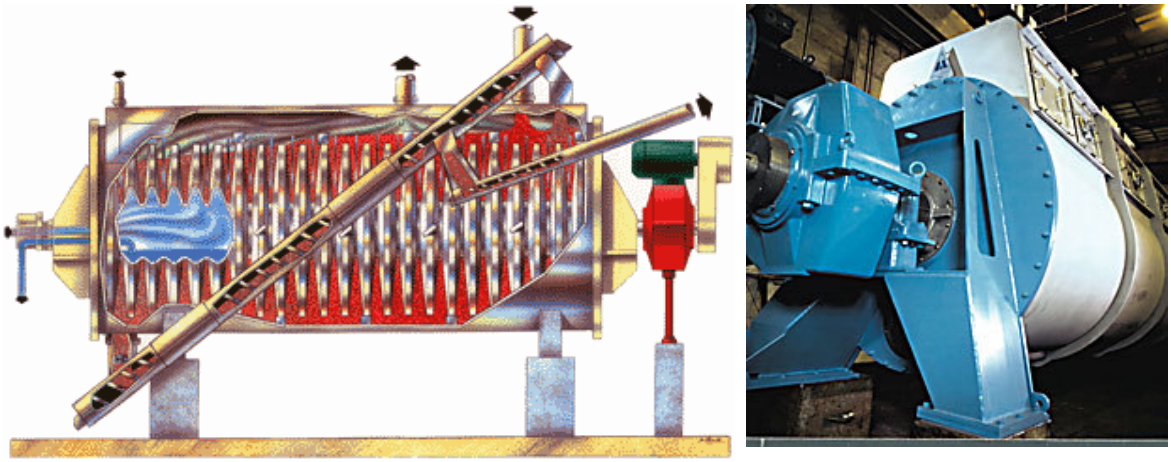
Tab. 10 Srovnání hlavních parametrů technologií pro sušení kalu

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.

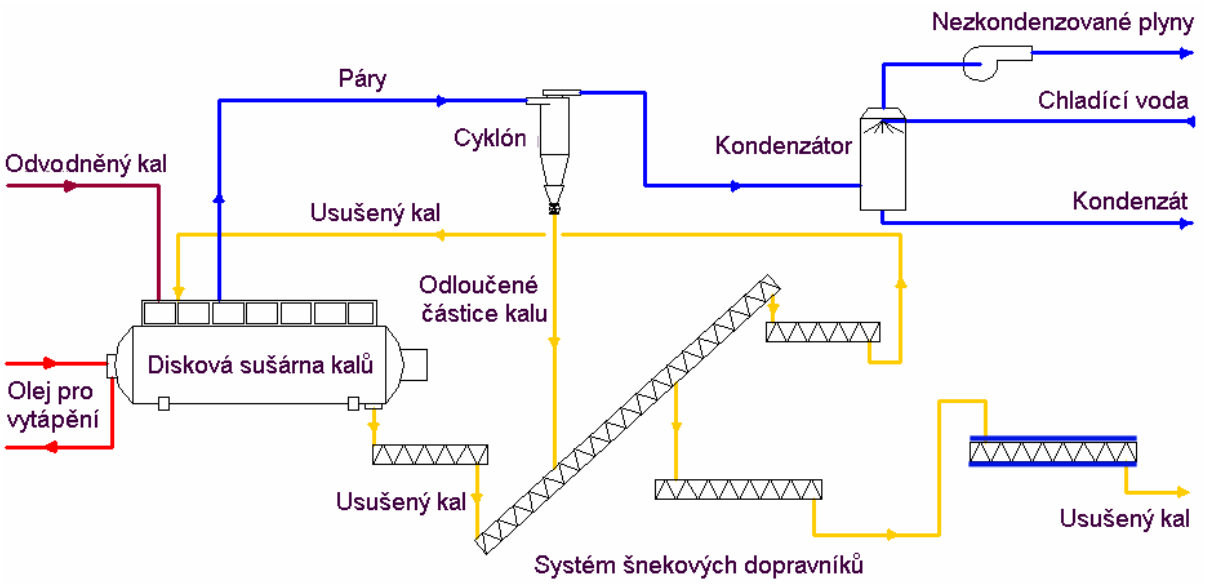
5.4.1 Vybraná technologie sušení kalů v diskové sušárně

Uvedená technologie sušení kalů v diskové sušárně pochází od německé firmy Atlas - Stord. Nepřímo vyhřívaná rotační disková sušárna je znázorněna na následujícím obr. 18.



Obr. 18 Nepřímo vyhřívaná, disková sušárna kalů

Popis technologie (schéma - viz obr. 19): Odvodněný kal je nejdříve dopraven do nepřímo vyhřívané diskové sušárny. Ta je tvořena horizontálním statorem a olejem vyhřívaným rotorem, který zároveň slouží k dopravě kalu během procesu sušení. Stator je v místě styku s kalem vyroben z nerezavějící oceli a je opatřený několika škrabkami zabraňujícími nahromadění kalu mezi disky rotoru. Vytápění je zajištěno horkým olejem, který protéká jednotlivými disky statoru. Přímo v sušárně je kal z důvodu překlenutí lepivé fáze smíchán s již vysušeným produktem na obsah sušiny minimálně 60 %.



Obr. 19 Technologie sušení kalů s rotační diskovou sušárnou

Ze sušárny je kal s obsahem sušiny cca 90 % odveden systémem šnekových dopravníků, z nichž poslední je chlazený vodou. Zde je teplota kalu snížena pod 50 °C z důvodu zamezení možnosti samovznícení kalu. Voda vypařená při sušení je zachycena v klenbě sušárny. Odpařené páry nejprve prochází cyklónem, kde dochází k separaci prachových částic. Ty jsou vraceny zpět do procesu. Páry jsou dále vedeny do sprchového chladiče, kde kondenzují. Kondenzát je odváděn do čistírny odpadních vod, resp. kanalizace, nezkondenzované plyny odcházejí do biofiltru nebo spalovacího zařízení. Celý proces sušení probíhá za mírného podtlaku.

Provozní jednotka této technologie sušení byla též navštívena v Drážďanech. V provozu zde jsou dvě linky, každá se zpracovatelskou kapacitou 5,4 t/h mokrého kalu (požadovaná kapacita pro cementárnu je 5,2 t/h). Vzhled kalu po usušení, který je z důvodu lepší dopravy v kontejnerech vlhčen vodou na cca 80 % sušiny, je možné vidět na následujícím obrázku.



Obr. 20 Vzhled kalu usušeného v rotační diskové sušárně

Základní technické údaje:

Počet linek: 1
Množství vlhkého kalu: 5800 kg/h Obsah sušiny vlhkého kalu: 21 %
Množství usušeného kalu: 1353 kg/h Obsah sušiny usušeného kalu: cca 90 %
Odpar vody: 4447 kg/h Instalovaný elektrický výkon: cca 160 kW
Tlak média v sušárně: 5 barG Pracovní teplota: 200 °C (max. 220 °C)
Plocha výměny tepla: 391 m^2

Rozměry sušárny:	délka: 13,4 m	šířka: 3,1 m	výška: 3,6 m
Výstupní šnekový dopravník:	délka: 1,7 m	průměr: ϕ 0,315 m	
Recyklační šnekový dopravník:	délka: 8,8 m	průměr: ϕ 0,5 m	
Šnekový dopravník:	délka: 1,7 m	průměr: ϕ 0,4 m	
Vykládací šnekový dopravník:	délka: 1,7 m	průměr: ϕ 0,2 m	

Obchodní údaje:

Rozsah dodávky: Rotační disková sušárna TST 2264 s výstupním šnekovým dopravníkem, ventilátor, kontrolní a měřící a regulační aparatura.

Dodávka nezahrnuje: ostatní šnekové dopravníky, cyklón, kondenzátor, stavbu a montáž, dopravu kalu do sušárny, izolace sušárny a jiných, inspekční plošiny, kotvení sušárny, potrubní spojení, odvod kondenzátu a nakládání s ním, stavební práce, povolení, instalace elektrických kabelů, náplně a mazadla (hydraulický olej,…), náhradní součásti.

Cena dodávky:

zařízení: 1 020 000 Euro

dohled při instalaci: 1. týden…… 8 850 Euro/ týden (5 dní 10 hod)
každý další týden… 5 400 Euro/ týden (5 dní 10 hod)

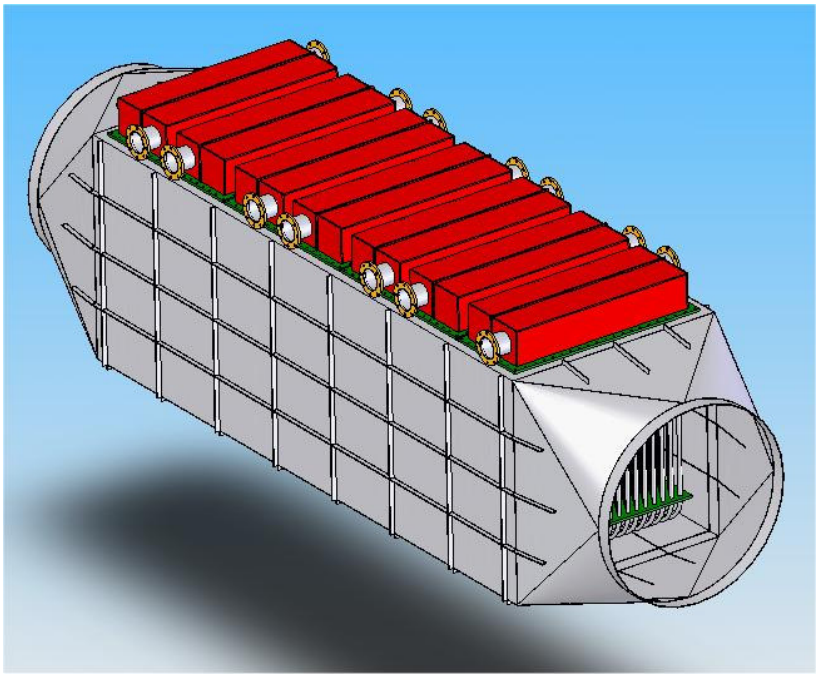
dohled při spouštění: 5 400 Euro/ týden (5 dní 10 hod)

6 OPTIMÁLNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU TEPLA PRO VYTÁPĚNÍ SUŠÁRNY

S technickým, ale také ekonomickým prověřením realizovatelnosti myšlenky svozu odvodněných čistírenských kalů do cementárny a jejich sušení odpadním teplem s následným využitím jako alternativního paliva, je bezpodmínečně spojena snaha minimalizovat náklady na zařízení celého systému. Jedním z těchto zařízení je i potřebný výměník získávající teplo ze spalin za účelem vytápění sušárny, jak je schematicky zobrazeno na obr. 17.

6.1 VÝBĚR TYPU VÝMĚNÍKU TEPLA

Volba typu výměníku tepla je závislá především na druhu médií a jejich parametrů - zejména na teplotě, tlaku, přípustné tlakové ztrátě, ale také znečistění médií a tedy požadavcích na čištění. Typickým výměníkem pro aplikaci předehřevu termooleje plynným médiem je trubkový výměník. Deskové výměníky pro tyto aplikace je též možné nalézt (např. deskové výměník Platular, francouzské firmy Barriquand Echangeurs [50], [51]), jsou to však speciální výměníky, jejichž detailní konstrukce a tedy i analyticky popsaný návrh není z dostupných materiálů zcela známý. Z těchto důvodů byl upřednostněn trubkový typ výměníku. Protože spaliny z provozu výpalu slinku jsou zaprášené, jeví se nevhodné, zejména z důvodu čištění, použití výměníku se svazkem trubek v plášti (shell and tube heat exchanger), naopak vhodným se jeví výměník se svazkem trubek (tube bundle heat exchanger), který umožňuje čištění na straně spalin např. použitím parních ofukovačů. Tento typ výměníku viz obr. 21, jehož základní koncepce návrhu pochází z odborných konzultací [52], byl pro tuto aplikaci ohřevu termooleje spalinami vybrán a navržen (viz následující kapitoly).



Obr. 21 Výměník tepla se svazky „U“-trubek a sériově propojenými sekcemi

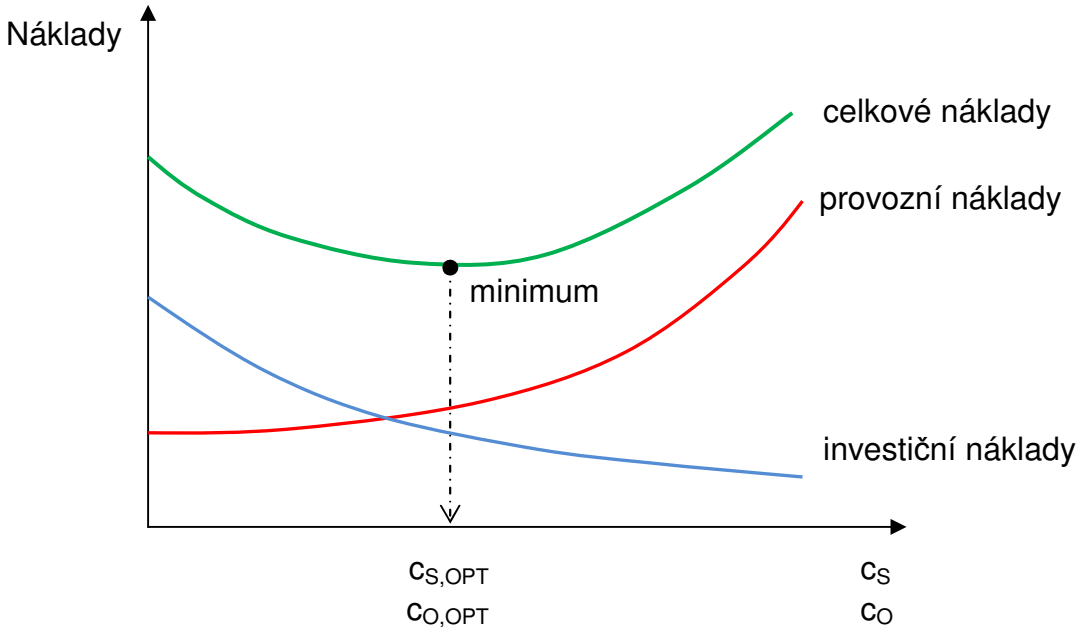
6.2 STRATEGIE OPTIMÁLNÍHO NÁVRHU VÝMĚNÍKU SE SVAZKEM „U“-TRUBEK

Pro návrh výměníku tepla nejvýhodnějšího z pohledu ekonomického je potřebné provést jeho optimalizaci. Pokud chceme efektivně vyhodnotit ekonomický přínos projektu, je nutné, aby taková analýza zahrnovala nejen počáteční investiční náklady do zařízení, ale také náklady provozní, které mají na výsledném ekonomickém efektu nemalý podíl. Celkové náklady je tedy možné principiálně rozdělit na dvě hlavní části – investiční a provozní náklady.

Mezi hlavní parametry ovlivňujícími investiční náklady u výměníků tepla můžeme zařadit plochu výměny tepla. Velikost plochy výměny tepla je závislá na intenzitě přestupu tepla, především tedy na součinitelích přestupů tepla na straně spalin a 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, související s výší investičních nákladů. Zároveň však se zvyšující se rychlostí média dochází ke zvyšování tlakových ztrát, a tedy k nárůstu provozních nákladů.

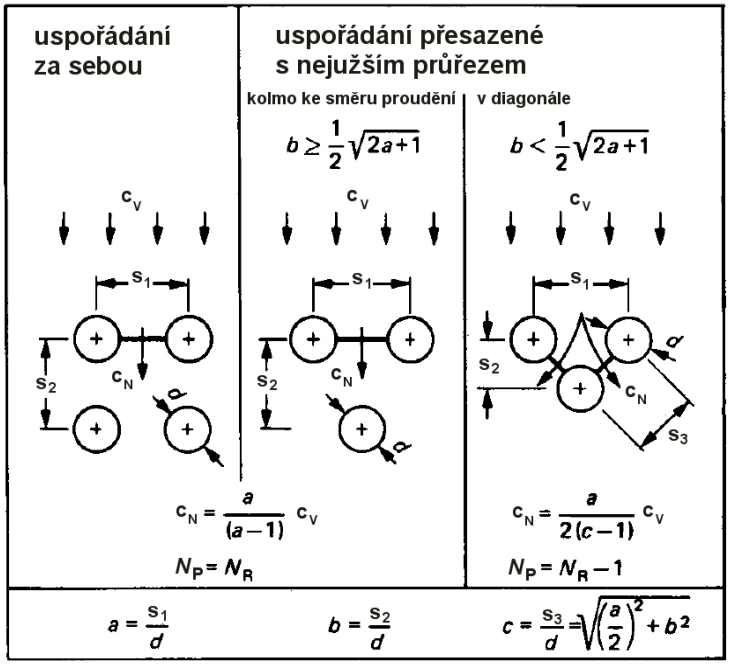
Cílem tedy je nalezení optima, v našem případě minima, celkových nákladů, jak je pro ilustraci znázorněno na obr. 22 (c_S, $c_{S,OPT}$ a c_O, $c_{O,OPT}$ jsou rychlosti spalin a oleje, index opt = optimální). Tento postup optimalizace celkových nákladů vychází z principů aplikovaných na deskových výměnících, uvedených v práci [53]. V následujících kapitolách je popsána geometrie, tepelně-hydraulický výpočet a sestavení celkových nákladů, které jsou potřebné k nalezení hledaného optima.



Obr. 22 Strategie optimálního návrhu výměníku tepla spaliny/ olej

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

Jak je patrné z obr. 21 výše, výměník se skládá z několika sériově zapojených sekcí. Základní uspořádání trubek ve svazku výměníku je možné rozlišit na dva základní typy – uspořádání za sebou a uspořádání přesazené, viz upravený obr. 23 z [54]. Dále existují i zvláštní případy uspořádání s částečným přesazením, tyto však se používají ve specifických případech [54].



Obr. 23 Základní typy uspořádání trubek [54]

Geometrie uspořádání je charakterizována příčným (a) a podélným poměrem (b) uspořádání podle vztahů:

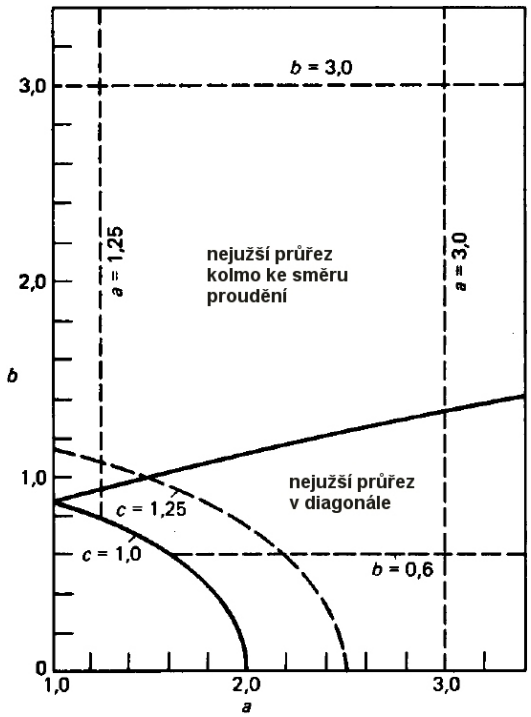
$$a = \frac{s_1}{d} \qquad \text{a} \qquad b = \frac{s_2}{d}, \qquad \text{(6-1) (6-2)}$$

kde s_1 je příčná (horizontální) a s_2 podélná (vertikální) rozteč, d vnější průměr trubky.

V případě přesazeného uspořádání s nejužším průřezem v diagonále, jak je patrné na obr. 23, je potřebné určit další parametr - diagonální poměr uspořádání c, což je poměr rozteče v diagonále s_3 a vnějšího průměru d. Při znalosti poměrů (a, b) a s využitím Pythagorovy věty je možné diagonální poměr c vyjádřit jako:

$$c = \frac{s_3}{d} = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2} \qquad \text{(6-3)}$$

Pro rozlišení místa s nejužším průřezem ve vztahu k hlavnímu směru proudění je možné použít následující obr. 24 [54], ve kterém jsou tyto oblasti rozlišeny v závislosti na geometrických poměrech a, b. Čárkovanými čarami jsou pak označeny hranice platnosti pro výpočet součinitelů tlakové ztráty podle vztahů viz kapitola 6.3.1 a příloha 5.



Obr. 24 Určení nejužšího průřezu uspořádání, hranice platnosti vztahů pro výpočet součinitelů tlakové ztráty [54]

Protože nejintenzivnější přestup tepla je pozorován u vystřídaného uspořádání s vrcholovým úhlem 60°, byl pro další návrh nalezení efektivního a optimálního řešení výměníku zvolen tento typ uspořádání. Pro takovouto konfiguraci platí mezi příčnou a podélnou roztečí vztah:

$$s_2 = \sin\left(\frac{2}{3}\pi\right) \cdot s_1 \tag{6-4}$$

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 [21], [55], [56]. 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 [54], ve kterém se zmíněný jev ručního odečítání pomocných koeficientů z grafů (pro zautomatizovanou optimalizaci jev nevýhodný), nevyskytuje.

6.3.1 Výpočet tlakových ztrát ve výměníku tepla

V této kapitole jsou popsány tlakové ztráty spalin a oleje ve výměníku, nezbytných zejména pro určování provozních a následně celkových nákladů výměníku.

Tlakové ztráty na straně spalin

Tlaková ztráta spalin proudících kolmo přes svazek trubek je v [54] definována následovně:

$$\Delta p_S = \xi \cdot N_P \cdot \frac{\rho_S \cdot c_N^{\,2}}{2}, \tag{6-5}$$

kde ξ je součinitel tlakové ztráty, blíže popsaný v následujícím textu, N_P je počet překážek ve směru proudění, ρ_S hustota spalin a c_N rychlost spalin v nejužším průřezu. V případě, že nejužší průtočný průřez mezi trubkami je kolmý ke směru proudění spalin, jako je případ přesazeného uspořádání s vrcholovým úhlem 60°, je N_P rovno N_R – počtu řad. Rychlost v nejužším průřezu c_N je při tomto uspořádání vyjádřena v závislosti na rychlosti ve volném průřezu c_V a geometrii uspořádání trubek.

$$c_N = \frac{a}{(a-1)} \cdot c_V, \tag{6-6}$$

Součinitel tlakové ztráty ξ je funkcí Reynoldsova čísla a geometrického uspořádání (rovnice (6-1), (6-2)). Reynoldsovo číslo na straně spalin je pak definováno jako:

$$\mathrm{Re}_S = \frac{c_N \cdot d \cdot \rho_S}{\eta_S}, \tag{6-7}$$

kde η_S je dynamická viskozita spalin. Hustota (v rovnicích (6-5) i (6-7)) a dynamická viskozita spalin jsou hodnoty dosazené při střední teplotě (t_S) a středním tlaku (p_S) spalin.

$$t_S = \frac{t_{S1} + t_{S2}}{2} \quad \text{a} \quad p_S = \frac{p_{S1} + p_{S2}}{2}, \tag{6-8) (6-9}$$

kde t_{S1}, t_{S2} a p_{S1}, p_{S2} jsou hodnoty teplot a tlaků na vstupu a výstupu spalin z výměníku tepla. Protože hodnota výstupního tlaku je na počátku výpočtu neznámá, je možné dojít k výsledku iteračním postupem. Ve většině případů je však tlaková ztráta na straně spalin mnohem menší než tlak spalin na výstupu ($\Delta p_S \ll p_{S2}$), a je tedy možné s dostatečnou přesností použít pro určení těchto fyzikálních vlastností hodnotu vstupního tlaku p_{S1}.

Při znalosti výše uvedených vztahů a vztahů uvedených viz příloha 5, pro určení součinitelů tlakové ztráty při laminárním a turbulentním proudění, příslušných korekčních faktorů a vztahu pro výpočet Reynoldsova čísla je možné po úpravách vyjádřit celkový součinitel tlakové ztráty rovnic (6-5) a (0-10) následovně:

$$\xi = \frac{280 \cdot \pi \cdot \left[\left(b^{0,5} - 0,6\right)^2 + 0,75\right] \cdot (a-1) \cdot \eta_S}{\left(4 \cdot a \cdot b - \pi\right) \cdot a^{2,6} \cdot c_V \cdot d \cdot \rho_S} \cdot \left(\frac{\eta_{S,W}}{\eta_S}\right)^{\left\{\frac{0,57}{\left[\left(\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}\right) - 1\right]^{0,25}}\right\}} +$$

$$+ \left\{\frac{2,5 + \left(\frac{1,2}{(a-0,85)^{1,08}}\right) + 0,4 \cdot \left(\frac{b}{a} - 1\right)^3 - 0,01 \cdot \left(\frac{a}{b} - 1\right)^3}{\left(\frac{a}{(a-1) \cdot \eta_S} \cdot c_V \cdot d \cdot \rho_S\right)^{0,25}}\right\} \cdot \left(\frac{\eta_{S,W}}{\eta_S}\right)^{0,14} \cdot$$

$$\cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\frac{a}{(a-1) \cdot \eta_S} \cdot c_V \cdot d \cdot \rho_S + 200}{1000}\right)\right], \qquad (6\text{-}10)$$

kde $\eta_{S,W}$ je dynamická viskozita spalin při střední teplotě stěny trubky t_W (viz rovnice (6-11)).

Oblast platnosti rovnice (6-10) při přesazeném uspořádání s úhlem 60° je následující:

- Minimální počet řad N_R=5.
- Reynoldsovo číslo v rozmezí $1 \le Re_S \le 3.10^5$

  Příčný a podélný poměr:
- pro $Re_S < 10^3$ jsou známy hodnoty pro uspořádání:
  a x b = 1,25 x 1,0825; 1,5 x 1,299 a 1,768 x 0,884
- pro $Re_S \ge 10^3$ je oblast platnosti:
  1,25 ≤ a ≤ 3,0
  0,6 ≤ b ≤ 3,0

Střední teplotu stěny trubky určíme ze vztahu:

$$t_W = \frac{t_S + t_O}{2}, \qquad (6\text{-}11)$$

kde t_O je střední teplota oleje určena analogicky jako střední teplota spalin t_S v rovnici (6-8).

Při využití vztahu (6-6) pro vyjádření rychlosti c_N a dosazením počtu řad N_R za N_P , je tlaková ztráta na straně spalin definována jako:

$$\Delta p_S = \xi \cdot N_R \cdot \frac{\rho_S \cdot \left(\frac{a}{(a-1)} \cdot c_V \right)^2}{2} \qquad (6\text{-}12)$$

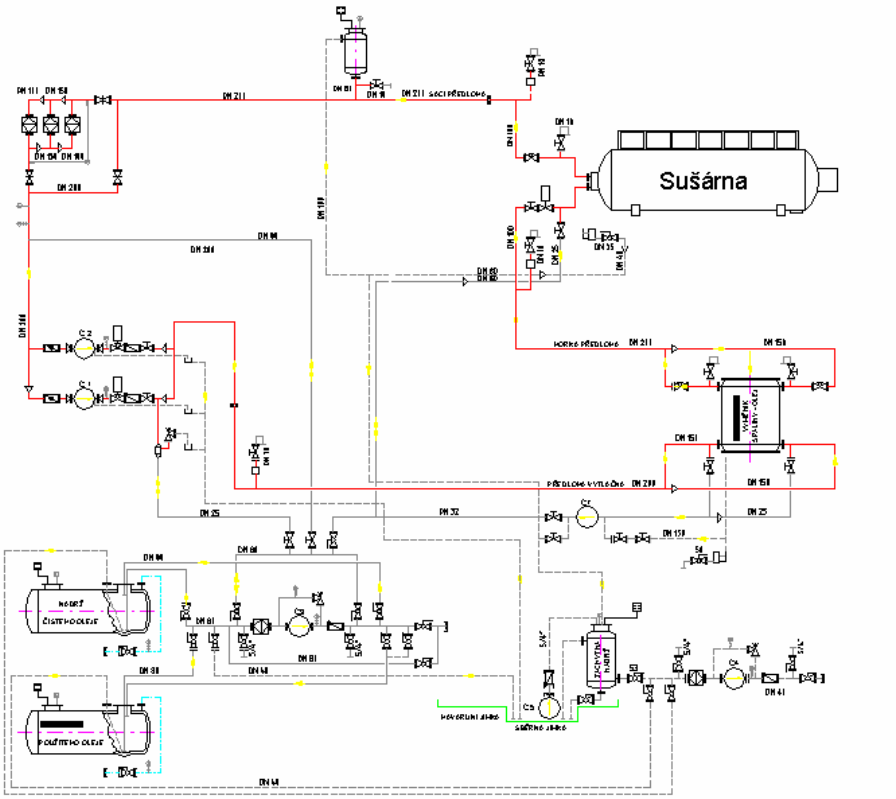
Jak je z výše uvedených rovnic (6-10) a (6-12) patrné, je možné tlakovou ztrátu spalin vyjádřit jako funkci fyzikálních vlastností spalin - ρ_S, η_S, $\eta_{S,W}$, průměru, rychlosti ve volném průřezu výměníku, poměrech geometrického uspořádání a, b a počtu řad N_R.

Tlakové ztráty na straně oleje

Z důvodů optimálního návrhu celého systému vytápění sušárny, také z důvodů analýzy komplexních nákladů spojených s tímto systémem vytápění, a tedy i s celkovou investicí o uvažované technologii sušení kalu, byl po konzultacích předběžně navržen olejový okruh, viz obr. 25 a příloha 6.

Cirkulaci oleje zabezpečuje odstředivé čerpadlo, jedno v provozu, druhé sloužící jako záložní. Na sací předloze je umístněna expanzní nádrž a tři olejové filtry, na výtlačné předloze je umístněn výměník spaliny-olej.

Tzv. „skladové hospodářství“ se sestává z dvou nádrží na čistý a použitý olej, záchytné nádrže a manipulačních čerpadel. Celý okruh by byl umístněn v bezpečnostní betonové jímce.



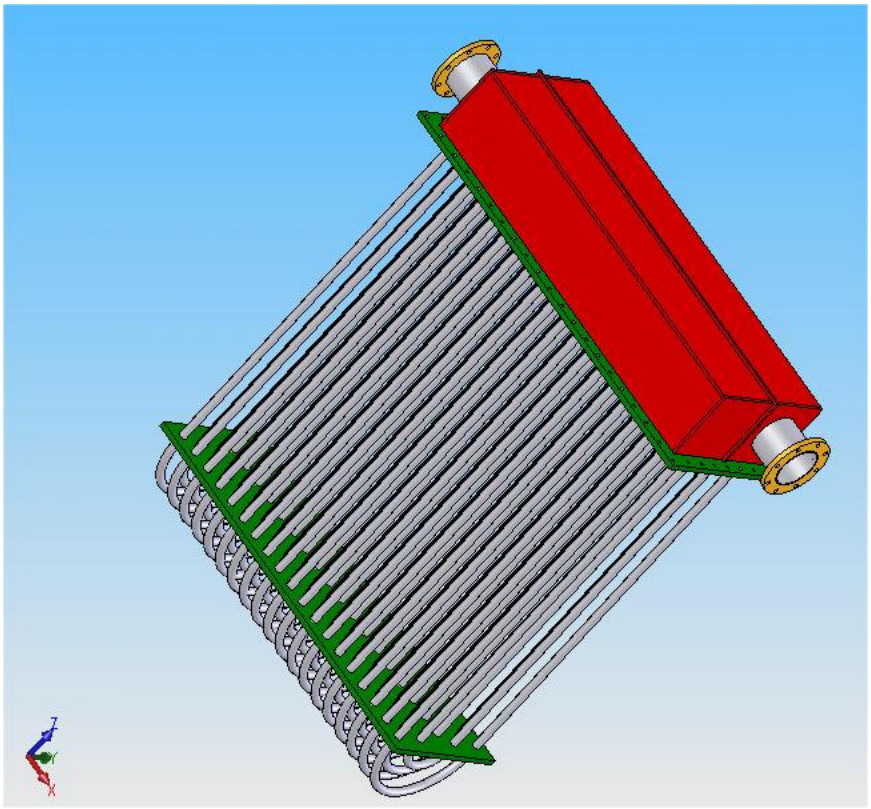
Obr. 25 Olejový okruh sušárny

Tlakové ztráty výměníku na straně oleje (Δp_O) je možné rozdělit na tři hlavní části, tlakovou ztrát při průtoku trubkovým hadem, vstupních a výstupních kolektorů a tlakovou ztrátu propojení jednotlivých sekcí:

$$\Delta p_O = N_S \cdot \left(\Delta p_{O,TR} + \Delta p_{O,KOL} + \Delta p_{O,PROP} \right), \qquad (6\text{-}13)$$

kde N_S je počet sekcí výměníku, $\Delta p_{O,TR}$ tlaková ztráta v trubkách jedné sekce výměníku, $\Delta p_{O,KOL}$ tlaková ztráta vstupního a výstupního kolektoru sekce, $\Delta p_{O,PROP}$ tlaková ztráta propojení (obloukem) kolektorů, zahrnující tlakovou ztrátu nátoku i výtoku z kolektorů.

Tlaková ztráta kolektorů bývá oproti tlakové ztrátě vlastního trubkového hadu malá [57]. Pro zvolené uspořádání a průměr trubek však tlaková ztráta kolektorů spolu s dalšími parametry ovlivňuje nerovnoměrnost proudění v jednotlivých trubkách. Jedním ze způsobů, jak tento jev minimalizovat je takové navržení kolektoru, kdy jeho tlaková ztráta je oproti tlakové ztrátě v trubkách zanedbatelná, jak je blíže popsáno v kapitole 6.3.3.



Obr. 26 Sekce navrhovaného výměníku s vstupním a výstupním kolektorem oleje

Tlakovou ztráta v trubkách jedné sekce výměníku $\Delta p_{O,TR}$ je možné rozepsat jako:

$$\Delta p_{O,TR} = \frac{\lambda_{OL} \cdot l_{tc}}{d_i} \cdot \frac{c_O^2}{2} \cdot \rho_O + \left(\Sigma \xi_{O,T}\right) \cdot \frac{c_O^2}{2} \cdot \rho_O \,, \tag{6-14}$$

kde λ_{OL} je součinitel tření oleje v trubce, l_{tc} je celková délka trubky jednoho proudu (v rámci jedné sekce), d_i vnitřní průměr trubky, c_O rychlost oleje v trubkách, ρ_O hustota oleje při střední teplotě oleje t_O (analogie ke střední teplotě spalin – viz rovnice (6-8)), $\Sigma \xi_{O,T}$ suma součinitelů místních odporů trubkového hadu.

Tlakovou ztrátu při průtoku propojení mezi kolektory $\Delta p_{O,PROP}$ zahrnující ztrátu nátoku a výtoku z kolektorů je možné rozepsat jako:

$$\Delta p_{O,PROP} = \left(\Sigma \xi_{O,PR}\right) \cdot \frac{c_{O,PR}^2}{2} \cdot \rho_O \,, \tag{6-15}$$

kde $\Sigma\xi_{O,PR}$ je suma součinitelů místních odporů propojení kolektorů a $c_{O,PR}$ je rychlost oleje v propojovacím potrubí kolektorů.

Hlavními parametry pro určení součinitele tření λ_{OL} jsou Reynoldsovo číslo Re_O při proudění oleje trubkou a poměr vnitřního průměru k ekvivalentní drsnosti potrubí d_i / k_i, tzv. poměrná hladkost [58].

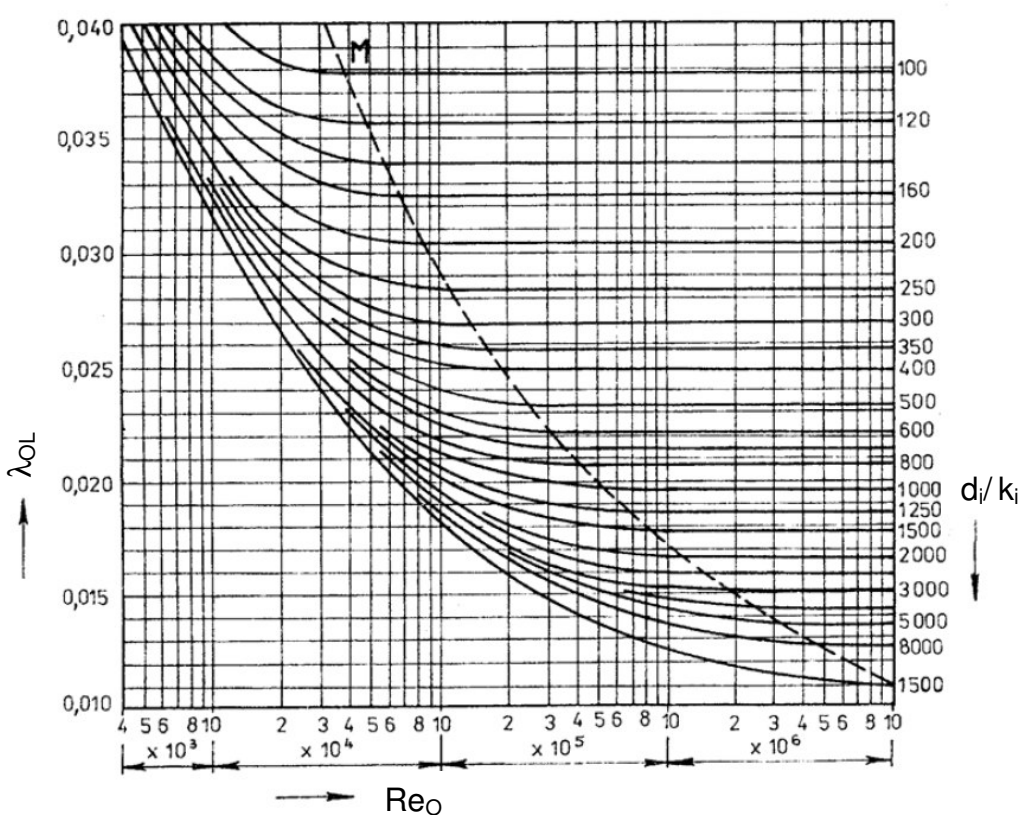
$$\mathrm{Re}_O = \frac{c_O \cdot d_i \cdot \rho_O}{\eta_O} \,, \tag{6-16}$$

kde η_O je dynamická viskozita oleje dosazená při střední teplotě t_O.

Součinitel tření λ_{OL} je možné stanovit např. ručním odečtem z Moodyho diagramu, viz obr. 27. Pro zautomatizovanou optimalizaci výměníku je však výhodnější použít matematické vyjádření. Pro tento účel je možné s dostatečnou přesností [50] aplikovat níže uvedené vztahy [58] pro jednotlivé oblasti proudění.

Pro laminární proudění (Re_O<2300) v kruhovém potrubí je součinitel tření závislý pouze na Reynoldsově čísle:

$$\lambda_{OL} = \frac{64}{\mathrm{Re}_O} \,, \tag{6-17}$$



Obr. 27 Moodyho diagram pro určení součinitele tření [58].

Pro přechodovou oblast a zcela rozvinuté turbulentní proudění přibývá k Reynoldsovu číslu parametr d_i/k_i, tzv. poměrná hladkost. Tyto dvě oblasti odděluje tzv. mezní křivka, znázorněná v Moodyho diagramu (obr. 27) čárkovanou čarou a písmenem M anebo mezním Reynoldsovým číslem, které je možné přibližně určit ze vztahu:

$$\mathrm{Re}_{M,O} \cong 445 \cdot \frac{d_i}{k_i}, \tag{6-18}$$

V přechodové oblasti proudění ($2300<\mathrm{Re}_O<\mathrm{Re}_{M,O}$) je součinitel tření definován jako:

$$\lambda_{OL} = \frac{1{,}42}{\left(\log \mathrm{Re}_O \frac{d_i}{k_i}\right)^2} \tag{6-19}$$

Dle [50] velmi dobře vyhovuje rovnice (*Colebrook, White [54] - rovnice pro přechodovou oblast*):

$$\lambda_{OL} = \left(\frac{1}{-2\log\left[\left(\frac{6{,}81}{\mathrm{Re}_O} \right)^{0{,}9} + \frac{k_i}{3{,}7 \cdot d_i} \right]} \right)^2 \tag{6-20}$$

Hodnoty ekvivalentní drsnosti k_i, někdy též nahrazované střední výškou nerovnoměrností povrchu ε, je možné najít v běžné literatuře zabývající se hydraulickými ztrátami. Přehled rozsahu používaných hodnot ekvivalentních drsností pro běžně se vyskytující materiály můžeme nalézt např. v [59].

V oblasti plně rozvinutého turbulentního proudění je součinitel tření funkcí již jen poměrné hladkosti, v Moodyho diagramu (obr. 27) přímky rovnoběžné s osou x, definován Nikuradseho vztahem jako:

$$\lambda_{OL} = \frac{1}{\left(1{,}14 + \log \frac{d_i}{k_i} \right)^2} \tag{6-21}$$

Při uvážení rovnice (6-19) pro určení součinitele tření a rovnic (6-13) až (6-15), pak pro tlakovou ztrátu ve výměníku na straně oleje můžeme psát:

$$\Delta p_O = N_S \cdot \frac{\rho_O}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{1{,}42}{\left(\log \frac{c_O \cdot d_i^2 \cdot \rho_O}{k_i \cdot \eta_O} \right)^2 \cdot d_i} \cdot l_{tc} + \left(\Sigma \xi_{O,T} \right) \right) \cdot c_O^2 + \left(\Sigma \xi_{O,PR} \right) \cdot c_{O,PR}^2 \right\} \tag{6-22}$$

V případě, že se nacházíme v jiné oblasti proudění, použijeme pro výpočet součinitele tření místo rovnice (6-19) vztahy odpovídající příslušné hodnotě Re_O (oblasti proudění).

Jak je patrné, celková tlaková ztráta výměníku na straně oleje je funkcí počtu sekcí, termofyzikálních vlastností oleje (hustoty a dynamické viskozity), vnitřního průměru, rychlosti oleje v trubkách, celkové délky trubky v rámci jedné sekce, ekvivalentní drsnosti a sum součinitelů místních odporů.

6.3.2 Přenos tepla ve výměníku se svazkem trubek – „tube bundle“

Tepelný tok (výkon) výměníku se svazkem trubek je definovaný rovnicí [55], [60]:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_M \ , \tag{6-23}$$

kde $\dot{Q}$ je tepelný tok, který je v našem případě roven tepelnému potenciálu potřebnému pro sušení kalu, definovaného v kapitole 4.1, k je součinitel prostupu tepla, A plocha výměny tepla a ΔT_M je střední teplotní rozdíl.

Pro výpočet součinitele prostupu tepla můžeme využít následující rovnici:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{d}{d_i} \cdot \frac{1}{\alpha_O} + R_{f1}\right) + \frac{d}{2 \cdot \lambda_t} \cdot \ln\left(\frac{d}{d_i}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_S} + R_{f2}\right)} \ , \tag{6-24}$$

kde α_O a α_S je součinitel přestupu tepla na straně oleje a spalin, R_{f1} a R_{f2} jsou součinitele zanášení (fouling factors) na straně oleje a spalin, λ_t je tepelná vodivost trubky, stanovená při střední teplotě stěny trubky t_W (rovnice (6-11)).

U teplonosného oleje zanášení nepředpokládáme, tedy R_{f1}=0. Protože se hodnotu součinitele zanášení spalin pro tento typ, prachovými částicemi znečištěných, spalin a dané podmínky v literatuře nalézt nepodařilo, byl vliv zanášení spolu s možnými nerovnostmi proudění obou médií nahrazen 2% navýšením požadovaného výkonu výměníku. Pro dané podmínky byl vybrán uhlíkový materiál. Tepelná vodivost pro střední teplotu stěny trubky, při interpolaci z hodnot uvedených v [61], činí v našem případě cca 51 W/m.K.

Pro celkovou plochu výměníku A platí vztah:

$$A = \pi \cdot d \cdot l_t \cdot n_t \ , \tag{6-25}$$

kde l_t je délka trubky a n_t je celkový počet trubek ve výměníku.

Střední teplotní rozdíl pro křížový tok můžeme stanovit ze vztahu:

$$\Delta T_M = F \cdot \Delta T_{\ln} \ , \tag{6-26}$$

kde F je korekční faktor a ΔT_{ln} je střední teplotní logaritmický spád. Korekční faktor je možné odečíst např. z grafů dle [56] v závislosti na uspořádání proudů, tzv. termické účinnosti P a poměru tepelných kapacit R, které určíme ze vztahů:

$$P = \frac{t_{S2} - t_{S1}}{t_{O1} - t_{S1}} \qquad a \qquad R = \frac{m_O \cdot cp_{SS}}{m_S \cdot cp_{SO}} = \frac{t_{O1} - t_{O2}}{t_{S2} - t_{S1}} , \tag{6-27) (6-28}$$

kde m_O a m_S je hmotový průtok oleje a spalin, cp_{SS} a cp_{SO} jsou střední měrné tepelné kapacity spalin a oleje, t_{S1}, t_{S2} a t_{O1} t_{O2} jsou vstupní a výstupní teploty spalin a oleje.

V našem případě byl korekční faktor F, odečtený z uvedených grafů, téměř roven jedné, tzn., že výsledky jsou velmi blízké čistě protiproudému uspořádání výměníku.

Střední teplotní logaritmický spád ΔT_{ln} je dán vztahem:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(t_{S1} - t_{O2}) - (t_{S2} - t_{O1})}{\ln\left(\frac{t_{S1} - t_{O2}}{t_{S2} - t_{O1}}\right)} \tag{6-29}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin

Součinitel přestupu tepla pro proudění spalin přes svazek trubek je dle [54] definován jako:

$$\alpha_S = \frac{\dot{q}}{\Delta t_{\ln}}, \tag{6-30}$$

kde $\dot{q}$ je měrný tepelný tok a Δt_{ln} je logaritmický teplotní rozdíl, definovaný vztahem:

$$\Delta t_{\ln} = \frac{(t_W - t_{S1}) - (t_W - t_{S2})}{\ln \frac{t_W - t_{S1}}{t_W - t_{S2}}}, \tag{6-31}$$

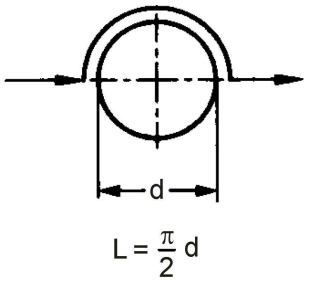
kde t_{s1} je teplota spalin na vstupu do výměníku, t_{s2} teplota spalin na výstupu z výměníku a t_w je střední teplota trubky definovaná rovnicí (6-11).

Pro určení součinitele přestupu tepla při praktických řešeních se využívá bezrozměrného parametru, charakteristického pro přestup tepla - Nusseltova čísla. Tento parametr je dle [55] obecně dán vztahem:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}, \tag{6-32}$$

kde α je součinitel přestupu tepla (spalin,…), L je charakteristický lineární rozměr a λ tepelná vodivost, v tomto případě tepelná vodivost spalin. Charakteristický lineární rozměr je v našem případě obtékaná délka trubky, viz obr. 28, určena jako:

$$L = \frac{\pi}{2} \cdot d \tag{6-33}$$



Obr. 28 Charakteristický lineární rozměr L – obtékaná délka [54]

Nusseltovo číslo je obecně závislostí čísla Reynoldsova a Prandtlova [55]. Dále popsaný výpočet Nusseltova čísla při proudění tekutiny přes svazek trubek je čerpán z [54]. Reynoldsovo číslo vyjadřující poměr setrvačných a třecích sil je také parametr pro rozlišení laminárního a turbulentního proudění. Prandtlovo číslo je poměr látkových veličin média.

Nusseltovo číslo pro svazek trubek je zde definováno jako:

$$Nu_{SV,0} = f_A \cdot Nu_{TR}\,, \tag{6-34}$$

kde f_A je faktor uspořádání trubek a Nu_{TR} je Nusseltovo číslo při obtékání jedné samotné trubky. Faktor uspořádání je funkcí geometrického uspořádání a pro obtékání svazku trubek s přesazeným uspořádáním je definovaný jako:

$$f_A = 1 + \frac{2}{3 \cdot b}\,, \tag{6-35}$$

kde b je podélný poměr uspořádání, viz (6-2).

$$Nu_{TR} = 0{,}3 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}\,, \tag{6-36}$$

kde Nu_{lam} a Nu_{turb} jsou Nusseltova čísla při laminárním a turbulentním proudění definované níže.

$$Nu_{lam} = 0{,}664 \cdot \sqrt{\mathrm{Re}_\psi} \cdot \sqrt[3]{\mathrm{Pr}_S} \tag{6-37}$$

$$Nu_{turb} = \frac{0{,}037 \cdot \mathrm{Re}_\psi^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}_S}{1 + 2{,}443 \cdot \mathrm{Re}_\psi^{-0,1} \cdot \left(\mathrm{Pr}_S{}^{2/3} - 1\right)}\,, \tag{6-38}$$

Re_ψ je Reynoldsovo číslo v mezitrubkovém prostoru definované jako:

$$\mathrm{Re}_\psi = \frac{c_V \cdot L \cdot \rho_S}{\psi \cdot \eta_S}, \tag{6-39}$$

kde c_V je rychlost spalin ve volném průřezu výměníku, L charakteristický lineární rozměr – viz rovnice (6-33), ψ součinitel podílu mezitrubkového prostoru:

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot a}, \tag{6-40}$$

Prandtlovo číslo spalin je pak definováno vztahem:

$$\mathrm{Pr}_S = \frac{cp_S \cdot \eta_S}{\lambda_S}, \tag{6-41}$$

Termofyzikální vlastnosti spalin - cp_S měrná tepelná kapacita spalin, η_S dynamická viskozita a λ_S tepelná vodivost spalin jsou dosazené při střední teplotě viz (6-8).

Součinitel přestupu tepla na jednotlivých řadách trubek je odvislý od počtu předcházejících řad. Asi od první do patnácté řady se zvyšuje, pak postupně zůstává stejný. Při počítání středního Nusseltova čísla se tedy vliv počtu řad zohledňuje pouze při počtu řad menším než deset. Pro takové uspořádání se místo rovnice (6-34) použije vztah:

$$Nu_{SV,0} = \frac{1 + (N_R - 1) \cdot f_A}{N_R} \cdot Nu_{TR}, \tag{6-42}$$

kde N_R je počet řad.

Směr toku tepla (ohřev či chlazení) ovlivňuje u teplotně závislých látek přestup tepla [54]. Pro Nusseltovo číslo pro svazek trubek zahrnující vliv teplotní závislosti platí:

$$Nu_{SV} = K \cdot Nu_{SV,0}, \tag{6-43}$$

kde $Nu_{SV,0}$ je Nusseltovo číslo pro svazek trubek (viz rovnice (6-34)) a K je faktor teplotní závislosti definovaný pro plynné médium vztahem:

$$K = \left(\frac{T_S}{T_W} \right)^n, \tag{6-44}$$

kde T_S je střední teplota spalin ve stupních Kelvina, T_W střední teplota stěny trubky (rovnice (6-11)) ve stupních Kelvina a n je exponent závislý od druhu plynu.

Uváděných hodnot koeficientů n je málo. Pro chlazení jistého horkého plynného proudu je v [54] zmíněna hodnota n=0,26.

Součinitel přestupu tepla na straně spalin je při předpokladu počtu řad vyšším než 10, s využitím výše uvedených rovnic, možné vyjádřit následovně:

$$\alpha_S = \cdot\left(1+\frac{2}{3\cdot b}\right)\cdot\left[0{,}3+\sqrt{\left(0{,}664\cdot\sqrt{\frac{c_V\cdot\frac{\pi}{2}\cdot d\cdot\rho_S}{\left(1-\frac{\pi}{4\cdot a}\right)\cdot\eta_S}}\cdot\sqrt[3]{\frac{c_{p,S}\cdot\eta_S}{\lambda_S}}\right)^2}+\right.$$

$$\left.+\sqrt{\left(\frac{0{,}037\cdot\left(\frac{c_V\cdot\frac{\pi}{2}\cdot d\cdot\rho_S}{\left(1-\frac{\pi}{4\cdot a}\right)\cdot\eta_S}\right)^{0,8}\cdot\frac{c_{p,S}\cdot\eta_S}{\lambda_S}}{1+2{,}443\cdot\left(\frac{c_V\cdot\frac{\pi}{2}\cdot d\cdot\rho_S}{\left(1-\frac{\pi}{4\cdot a}\right)\cdot\eta_S}\right)^{-0,1}\cdot\left(\left(\frac{c_{p,S}\cdot\eta_S}{\lambda_S}\right)^{2/3}-1\right)}\right)^2}\right]\cdot\left(\frac{T_S}{T_W}\right)^{0,26}\frac{2\cdot\lambda_S}{\pi\cdot d} \qquad (6\text{-}45)$$

Jak je z výše uvedených rovnice (6-45) patrné, je možné součinitel přestupu tepla spalin vyjádřit jako funkci termofyzikálních a transportních vlastností spalin - ρ_S, η_S, λ_S, cp_S , průměru potrubí, rychlosti ve volném průřezu výměníku $c_{V,}$ poměrech geometrického uspořádání a, b a středních teplotách T_W a T_S.

Součinitel přestupu tepla na straně oleje

Pro součinitel přestupu tepla na straně oleje α_O je možné vyjít ze stejných vztahů (6-30), (6-32) jako při určení součinitele přestupu tepla na straně spalin. Místo α_S dosadíme α_O, L - charakteristický lineární rozměr je v tomto případě vnitřní průměr trubky d_i, a místo tepelné vodivosti spalin dosadíme tepelnou vodivost oleje λ_O. Vztah pro Nusseltovo číslo tedy dostane podoby:

$$Nu_O = \frac{\alpha_O \cdot d_i}{\lambda_O} \tag{6-46}$$

Pro výpočet Nusseltova čísla v přechodové oblasti a při turbulentním proudění oleje trubkou je možné použít Gnielinskeho vztah, obecně platný pro zmíněné oblasti proudění plynů a kapalin trubkou [54]:

$$Nu_{O,0} = \frac{\xi_O/8 \cdot (\mathrm{Re}_O - 1000) \cdot \mathrm{Pr}_O}{1 + 12{,}7 \cdot \sqrt{\xi_O/8} \cdot \left(\mathrm{Pr}_O^{\,2/3} - 1\right)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_i}{l_t}\right)^{2/3}\right], \tag{6-47}$$

kde l_t je délka trubky, ξ_O součinitel tlakové ztráty při proudění oleje, definovaný jako:

$$\xi_O = \left(1{,}82 \cdot \log_{10} \mathrm{Re}_O - 1{,}64\right)^{-2}, \tag{6-48}$$

Pr_O je Prandtlovo číslo oleje, které se stanoví stejně jako Prandtlovo číslo spalin (6-41) po dosazení příslušných fyzikálních vlastností oleje cp_O, η_O, λ_O při střední teplotě t_O a středním tlaku p_O oleje (analogicky jako pro spaliny viz (6-8) a (6-9).

Vztah (6-47) pro Nusseltovo číslo je platný pro $2300 < \mathrm{Re}_O < 1.10^6$ a poměr $d_i/l_t < 1$.

Směr toku tepla (ohřev či chlazení) ovlivňují u teplotně závislých látek přestup tepla. Pro Nusseltovo číslo zahrnující vliv teplotní závislosti platí:

$$Nu_O = Nu_{O,0} \cdot \left(\frac{\mathrm{Pr}_O}{\mathrm{Pr}_{O,W}}\right)^{0{,}11}, \tag{6-49}$$

kde $\mathrm{Pr}_{O,W}$ je kde Prandtlovo číslo oleje, určené při střední teplotě stěny trubky t_W, viz rovnice (6-11).

Při využití výše uvedených vztahů je po úpravách možné součinitel přestupu tepla na straně oleje definovat jako funkci rychlosti oleje c_O, průměru d_i a délky trubky l_t a termofyzikálních vlastností oleje jako:

$$\alpha_O = \frac{\left(1{,}82\cdot\log_{10}\left(\frac{c_O\cdot d_i\cdot\rho_O}{\eta_O}\right)-1{,}64\right)^{-2}\cdot\left(\frac{c_O\cdot d_i\cdot\rho_O}{\eta_O}-1000\right)}{8+101{,}6\cdot\sqrt{\left(1{,}82\cdot\log_{10}\left(\frac{c_O\cdot d_i\cdot\rho_O}{\eta_O}\right)-1{,}64\right)^{-2}/8}\cdot\left(\left(\frac{c_{p,O}\cdot\eta_O}{\lambda_O}\right)^{2/3}-1\right)}\cdot$$

$$\left[1+\left(\frac{d_i}{l_t}\right)^{2/3}\right]\cdot\frac{\left(c_{p,O}\cdot\eta_O\right)^{1{,}11}\cdot{\lambda_{O,W}}^{0{,}11}}{\left(\lambda_O\cdot c_{p,O,W}\cdot\eta_{O,W}\right)^{0{,}11}\cdot d_i} \qquad \text{(6-50)}$$

6.3.3 Problematika rovnoměrného rozdělení toku oleje v trubkách

V práci uvedené tepelně hydraulické výpočty předpokládají rovnoměrné rozdělení toku ve všech proudech jednotlivých sekcí výměníku.

Pokud se podíváme na samotný distributor, tento předpoklad však platí pouze v případě, že změna statického tlaku po délce distributoru způsobená třením a místními ztrátami je v rovnováze se změnou statického tlaku způsobenou změnou hybnosti [62]. Přitom tlaková ztráta způsobená třením a místními ztrátami statický tlak po délce distributoru snižuje a změna hybnosti, způsobená změnou objemu tekutiny odtokem do výtokových otvorů, tento tlak naopak zvyšuje. U kolektoru místní ztráty, ztráty třením i změna hybnosti směrem k výstupu statický tlak snižují.

Výše uvedená práce zmiňuje několik postupů výpočtu distributoru typu kropič s rovnoměrným rozdělením toku. Jeden z uvedených algoritmů předkládá možnost zajištění maximální stanovené nerovnoměrnosti proudění takovým návrhem, kdy tlaková ztráta ve výtokových otvorech bude řádově vyšší než tlaková ztráta vlastního distributoru. Podobného principu je možné využít i při návrhu systému distributor-trubky-kolektor, tak, aby nerovnoměrnost byla ve vymezené toleranci. V našem případě je tedy nutné řešit problematiku nerovnoměrnosti včetně návaznosti na výstupní komoru - kolektor, neboť vstup i výstup a jejich uspořádání nerovnoměrnost proudění ovlivňují.

Podle [63] je součinitel hydraulické nerovnoměrnosti možné definovat jako:

$$\eta_h = \frac{m_{TM}}{m_{TS}}, \qquad \text{(6-51)}$$

kde m_{TM} je průtok pracovní látky v trubce s nejmenším průtokem a m_{TS} je střední průtok trubkami příslušné výhřevné plochy.

Jak bylo zmíněné, na nerovnoměrnost proudění má mimo jiné vliv vzájemné uspořádání vstupní a výstupní komory (distributoru a kolektoru). Nejčastěji se můžeme setkat s dvěma základní typy - s uspořádáním „Z“ a uspořádáním „U“. V našem případě se jedná o uspořádání „Z“, kdy vstup a výstup média jsou na protilehlých čelních stranách komor. Pro tento typ uspořádání je dle [63] součinitel hydraulické nerovnoměrnosti možné určit ze vztahu:

$$\eta_h = \sqrt{1 - \frac{3 \cdot \Delta p'_{O,KOL} + \Delta p''_{O,KOL}}{4 \cdot \Delta p_{O,TR}}}\,, \tag{6-52}$$

kde $\Delta p'_{O,KOL}$ je změna tlaku po délce vstupního a $\Delta p''_{O,KOL}$ výstupního kolektoru, $\Delta p_{O,TR}$ zastupuje střední tlakovou ztrátu v trubkách, v našem případě se tedy jedná o tlakovou ztrátu oleje v trubkách jedné sekce výměníku, definovanou rovnicí (6-14).

Změny tlaku $\Delta p'_{O,KOL}$ a $\Delta p''_{O,KOL}$ je možné určit ze vztahů:

$$\Delta p'_{O,KOL} = k_1 \cdot \frac{c^2_{KOL1}}{2} \cdot \rho_O \quad \text{a} \quad \Delta p''_{O,KOL} = k_2 \cdot \frac{c^2_{KOL2}}{2} \cdot \rho_O\,, \tag{6-53) (6-54}$$

kde c_{KOL1} je rychlost ve vstupním kolektoru před první trubkou a c_{KOL2} je rychlost ve výstupním kolektoru za poslední trubkou. Jestliže je přechod mezi přívodním potrubím difuzor, součinitel k_1 se stanoví v závislosti na úhlu, který zaujímají trubky výhřevné plochy na obvodu rozdělovací komory. Součinitel k_2 je závislý na počtu řad trubek po obvodu komory a poměrné délce komory $l_{kol}/ D_{h,kol}$ (l_{kol} je délka kolektoru, $D_{h,kol}$ je průměr, v našem případě hydraulický průměr, kolektoru). Pro úhel 61 ÷ 120 °, počet řad 1 až 3 a poměrnou délku $l_{kol}/ D_{h,kol} < 20$ je v tabulkách [63] možné odečíst hodnoty k_1=0,86; k_2=2.

Při uvážení stejných rozměrů vstupní a výstupní komory pro výše uvedené rychlosti před první resp. za poslední trubkou platí $c_{KOL1} = c_{KOL2} = c_{KOL.}$ S využitím vztahů (6-52) až (6-54) a úpravami pak pro tuto rychlost můžeme psát:

$$c_{KOL} = \sqrt{\frac{\left(1 - \eta_h^2\right) \cdot 8 \cdot \Delta p_{O,TR}}{\left(3 \cdot k_1 + k_2\right) \cdot \rho_O}}\,, \tag{6-55}$$

Z tohoto vztahu je pak možné s využitím rovnice kontinuity navrhnout potřebný průřez kolektorů tak, aby byla splněna podmínka přípustné nerovnoměrnosti.

Pro připustěnou nerovnoměrnost 5 % (η_h=0,95), tlakovou ztrátu v trubkách $\Delta p_{O,TR}$ níže nalezené optimální konfigurace (viz kapitola 6.6.2) a uvedené hodnoty součinitelů k_1, k_2 vychází maximální hodnota rychlosti c_{KOL} = 1,37m/ s.

6.4 TERMOFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI SPALIN A OLEJE

Pro provedení výše uvedených tepelně-hydraulických výpočtů s následnou optimalizací výměníku je potřebné znát termofyzikální vlastnosti (hustotu, dynamickou viskozitu, měrnou tepelnou kapacitu a tepelnou vodivost) obou médií.

V případě oleje byly použity vlastnosti teplonosného oleje „Terminol 66“, uvedené v závislosti na teplotě viz příloha 7. Terminol 66 je syntetický teplonosič použitelný v rozsahu 0 až 350 °C [64].

Složení spalin bylo zjištěno z výsledků komplexního měření této linky výroby cementu [49]. Průměrné hodnoty objemových koncentrací složek spalin, pro které byly výpočty provedeny, jsou shrnuty v následující tab. 11.

objemová koncentrace							
CO_2 [%]	O_2 [%]	CO [%]	NO_X [ppm]	SO_2 [ppm]	Ar [%]	N_2 [%]	H_2O [%]
27,5	5,1	254,4	324,9	32,5	0,5	57,9	9,1

Tab. 11 Průměrné hodnoty složení spalin

Termofyzikální vlastnosti η_S, λ_S spalin byly počítány dle více metod. V následující tab. 12 jsou porovnány výsledky metod použitých v optimalizačním výpočtu s výsledky programu ChemCad 6.1.2, při střední teplotě a tlaku.

veličina	jednotka	použité metody	ChemCad 6.1.2.	abs. odchylka [%]
hustota - ρ_S	[kg/ m^3]	0,6210	0,6211	0,02
dynamická viskozita - η_S	[Pa.s]	2,78E-05	2,85E-05	2,34
měrná tepelná kapacita - cp_S	[J/ kg.K]	1117	1113	0,36
tepelná vodivost - λ_S	[W/ m.K]	0,0430	0,0439	2,05

Tab. 12 Porovnání metod použitých ve výpočtu s výsledky programu ChemCad

Pro výpočet hustoty byla použita stavová rovnice (pro směs plynu), pro dynamickou viskozitu kombinace rovnice Sutherlandovi (pro viskozitu složek [65]) a Herning Zipperovi [66] pro viskozitu směsi plynu (kritické hodnoty viskozity brány z [56]). Měrná tepelná kapacita byla počítána přes polynomický rozvoj [67], tepelná vodivost kombinací polynomického rozvoje pro složky [68] a Lehmanovi korelace pro směs plynu [67]. Jak je z této tabulky patrné, použité metody výpočtu vykazují v porovnání s výsledky programu ChemCad 6.2.1 pro účel optimalizace dostatečnou přesnost.

Rosný bod spalin pro uvedenou objemovou koncentraci spalin, spočítaný programem APEX- DEW Point činí cca 125 °C.

6.5 NÁKLADY NA ZAŘÍZENÍ PODÍLEJÍCÍ SE NA PŘENOSU TEPLA

Protože faktorů ovlivňujících výsledný ekonomický efekt celého projektu je větší množství, byla tato problematika rozdělena do dvou částí a řešena „per-partes“. První část (podskupina) je popsána blíže v této kapitole a tvoří ji optimalizační postup výběru nejvhodnější kombinace zařízení podílejících se na přenosu tepla v systému sušení kalů mimo vlastní sušárnu. Technicko-ekonomickému výběru sušárny je věnována samostatná kapitola 5.4. V kapitole 7 je pak blíže popsána celková ekonomická bilance projektu, zahrnující ostatní náklady (další vybavení olejového okruhu jako MaR, propojovací potrubí, kalové čerpadlo, …).

Jak bylo zmíněno v kapitole 6.2 hodnotu celkových nákladů je 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. Pro celkové náklady C_T tedy platí:

$$C_T = C_F + C_V \,, \tag{6-56}$$

kde C_F jsou fixní a C_V variabilní náklady. Variabilní náklady představují zejména náklady na provoz.

Žádaná optimalizace pak spočívá v hledání minima výsledné hodnoty pro různé varianty návrhu systému přenosu tepla.

Aby bylo možné zmíněné položky sčítat a následně optimalizovat, je nutné, aby jednotlivé veličiny, které zahrnují, byly vyjádřeny ve stejných jednotkách. Investiční náklady znamenají z větší míry jednorázové či prvotní výdaje oproti provozním nákladům, které mají charakter časový. Jako jedna z možností, v praxi často používaných, se nabízí převedení investičních nákladů do závislosti na čase přepočtením na jeden rok životnosti zařízení, viz kapitola 6.5.1.

6.5.1 Fixní náklady

Pro přepočtení investičních nákladů na roční hodnotu je možné s výhodou použít metodu anuit. Metoda předpokládá, že se po dobu ekonomické životnosti zařízení bude investice včetně úroků splácet ročními splátkami či amortizačními náklady. Tyto se získají vynásobením investičních nákladů anuitním faktorem a_f (viz vztah (6-57)). Jak uvádí [69] in [53], je možné na anuitní faktor pohlížet jako na míru pro dobu odepisování zařízení. Během doby provozu zařízení dochází k jeho opotřebovávání a stárnutí, a tím tedy ke snížení hodnoty, což se projevuje v celkových nákladech.

$$a_f = \frac{(1+r)^{T_Z}}{(1+r)^{T_Z} - 1} \cdot r_d \,, \tag{6-57}$$

kde r_d je diskontní sazba (míra), popsaná blíže v kapitole 7 (ekonomika) a T_Z počet roků ekonomické doby životnosti zařízení (u procesních zařízení se počítá přibližně 15 let). Podle [53], je též možné, s odkazem na literární zdroj, použít obvyklé anuitní faktory, které jsou zde pro jednotlivé zařízení procesního průmyslu shrnuty do přehledné tabulky.

Jak je zmíněné výše, pro určení celkových fixních nákladů je potřebné k celkovým investičním nákladům C_I přičíst i náklady na údržbu C_M, vyjádřené jako jejich poměrná část, viz rovnice (6-60). Celkové fixní náklady vyjádřené jako roční hodnotu můžeme pak stanovit následovně:

$$C_F = (C_I + C_M) \cdot a_f \tag{6-58}$$

Investiční náklady jsou v tomto případě tvořené zejména náklady na výměník spaliny/ olej a náklady na zařízení podílejících se na dopravě vzdušiny (spalin) a oleje. Náklady na sušárnu a zbytek olejového okruhu (potrubí, filtry, MaR, nádrže na čistý a použitý olej, …) považujeme za konstantu a z tohoto důvodu byly zahrnuty až do celkové ekonomické bilance – viz kapitola 7 . Můžeme tedy psát:

$$C_I = C_{I,\,E} + C_{I,\,P} + C_{I,\,F} \,, \tag{6-59}$$

kde $C_{I,\,E}$ jsou zmíněné investiční náklady na výměník, $C_{I,\,P}$ jsou investiční náklady na olejová čerpadla a $C_{I,\,F}$ jsou investiční náklady na ventilátor.

Jak je uvedeno výše, celkové náklady na údržbu C_M je možné stanovit jako podíl z nákladů investičních, vyjádřeno matematicky tedy:

$$C_M = C_I \cdot q \,, \tag{6-60}$$

kde q je parametr určující velikost nákladů na údržbu. Pro získání představy o výši této veličiny nám může posloužit následující tabulka [70] in [53] určující velikost výdajů u výměníku.

Výdaje na údržbu	q [-]	Poznámka
nízké	0,01 až 0,02	Případy, kdy nehrozí žádné nebo minimální nebezpečí znečištění nebo koroze teplosměnných ploch, např. automatické čistící systémy
střední	0,02 až 0,05	V případech kontrolovaných znečišťujících a korozních jevů, např. naplánované intervaly údržby a čištění
vysoké	0,05 až 0,10	Nekontrolované případy rychlého znečištění a silného opotřebení teplosměnných ploch

Tab. 13 Typické hodnoty nákladů na údržbu [70] in [53]

$C_{I,E}$ - Investiční náklady výměníku se svazkem trubek – „tube bundle type“

Nejpřesnější informaci o investičních nákladech bychom mohli získat při ocenění konkrétního výměníku. I zde by však u různých dodavatelů bylo s velkou pravděpodobností možné pozorovat rozdílné hodnoty. Pro optimalizační procedury však můžeme použít zjednodušující modely uváděné v literatuře, které při potřebné konfrontaci s reálnými výsledky, můžeme označit za výhodné a pro optimalizační účely dostatečné.

Pro stanovení nákladů na výměníky tepla existují různé typy modelů, podle [71] in [53] je však obecněji můžeme rozdělit do dvou skupin:

a) modely se součiniteli
b) exponenciální modely

ad a) Modely se součiniteli používají často větší počet veličin mající přibližně stejný vliv na celkovou cenu. Mezi tyto modely, pouze však s jednou veličinou, patří i model výpočtu nákladů z ceny jednoho kilogramu výměníku. Celkové investiční náklady je možné určit pouhým vynásobením hmotnosti výměníku tzv. „kilogramovou cenou“.

$$C_{I,E} = m_E \cdot C_{KG}\,, \tag{6-61}$$

kde m_E je hmotnost výměníku a C_{KG} kilogramová cena výměníku. Kilogramová cena je závislá zejména na složitosti výroby (počet, obtížnost svarů,…) a použitých materiálech. Je též spojena, jako veškeré zboží s proměnami na trhu. Dle [30] je možné pro tento typ výměníku z uhlíkového materiálu použít hodnotu přibližně 250 Kč/ kg.

ad b) Pro exponenciální modely je charakteristické matematické vyjádření v závislosti na menším počtu, převážně jedné charakteristické veličině, která má na investiční náklady dominantní vliv [53]. Např. to může být závislost na ploše výměny tepla, jak ukazuje tato rovnice [72]:

$$C_{I,E}(\$) = 30800 + 750 \cdot A^{0.81}, \tag{6-62}$$

kde A je plocha výměny tepla.

V disertační práci byly v optimalizačním výpočtu (pro porovnání) použity oba zde uvedené vztahy (6-61) i (6-62). Nakonec byl brán v potaz první zmíněný z těchto dvou, který vykazoval vyšší výslednou hodnotu. Aby hodnota z druhého vztahu (rovnice (6-62)) byla srovnatelná, musel by americký dolar v přepočtu na českou korunu stát v současné době přibližně 24 kč. Na zmíněnou nesrovnalost mohou tedy mít, kromě doby uplynulé od vzniku vztahu, též změny na trhu, jak potvrzuje i [21].

$C_{I,P}$ a $C_{I,F}$ - Investiční náklady na čerpadla oleje a ventilátor spalin

Pro stanovení investičních nákladů na rotační stroje zajišťujících dopravu stlačitelných médií, jako jsou kompresory, dmychadla, ventilátory je, jak uvádí [73] a [74] in [53], možné použít následující zobecněný vztah:

$$C_{I,R} = b_K \cdot (V \cdot \Delta p)^{C_K}, \tag{6-63}$$

kde V je objemové průtočné množství dopravované tekutiny, Δp je celková tlaková ztráta, ve které jsou tedy zahrnuty veškeré ztráty třením a odpory, které proudění musí v rámci celého systému překonat (ohyby, ventily, výměníky, filtry, …). Koeficienty b_K a c_K zohledňují cenový trend investičních nákladů pro dané zařízení. Pro ventilátor tedy můžeme psát:

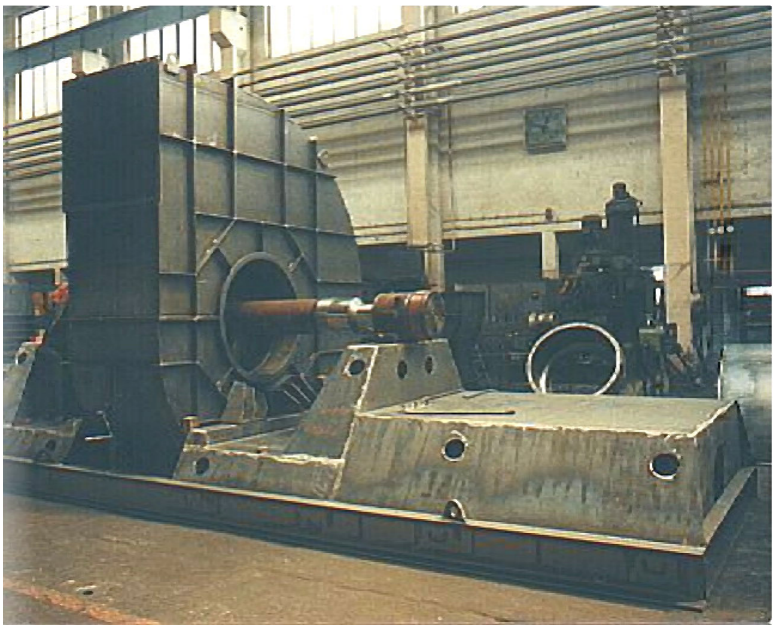
$$C_{I,F} = b_{K,F} \cdot (V_S \cdot \Delta p_{S,C})^{C_{K,F}}, \tag{6-64}$$

kde V_S je objemový průtok spalin, $\Delta p_{S,C}$ je tlaková ztráta spalin při průchodu celým systémem toku spalin, v našem případě tedy v cementárně (rotační pec, šachtové výměníky, kouřovody, …), $b_{K,F}$ a $c_{K,F}$ jsou koeficienty zohledňující cenový trend investičních nákladů pro ventilátor. V našem případě se jedná o vysokotlaký radiální

ventilátor. Pro představu, v práci [53] jsou pro radiální (viz obr. 29, [75]) vysokotlaké ventilátory firmy Klima a.s., Prachatice nalezeny následující hodnoty: $b_{K,F}$ = 66,285 a $c_{K,F}$ = 0,883.

Spalinové ventilátory instalované v provozu cementárny disponují rezervou pro větší tlakové ztráty spalin. Z tohoto důvodu bylo možné v optimalizačním výpočtu při tlakové ztrátě výměníku na straně spalin do hodnoty cca 1 kPa (hodnota viz [52]) považovat investiční náklady na ventilátor nulové ($C_{I,F}$ = 0), neboť zvýšení tlakové ztráty na straně spalin vestavěním výměníku tepla by pokryl již instalovaný ventilátor. Investiční náklady na ventilátor je nutné uvažovat pouze v případě, že tlaková ztráta výměníku přesahuje zmíněnou hodnotu.

Z výše uvedeného vyplývá, že pokud bude nalezeno technicky přijatelné řešení pro žádaný tepelný výkon výměníku při tlakové ztrátě do cca 1kPa, bude se s velkou pravděpodobností optimum nalézat v tomto rozmezí, neboť zde budou investiční náklady na poměrně velký ventilátor nulové a dále budou i nižší provozní náklady ventilátoru (blíže viz kapitola 6.5.2 popisující provozní náklady).

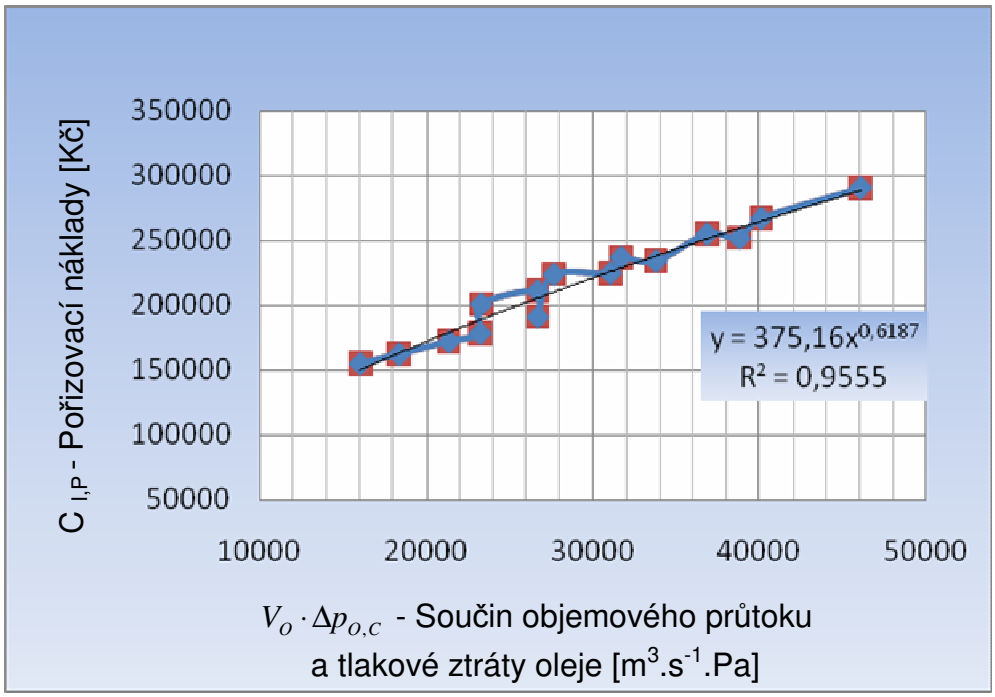


Obr. 29 Radiální ventilátor firmy Klima a.s., Prachatice [75]

Podle [50] je možné vztah (6-63) použít i pro stanovení pořizovacích nákladů pro čerpadla zajišťující cirkulaci teplonosiče (teplonosného oleje), tedy:

$$C_{I,P} = b_{K,P} \cdot (V_O \cdot \Delta p_{O,C})^{C_{K,P}}, \qquad (6\text{-}65)$$

kde V_O je objemový průtok oleje, $\Delta p_{O,C}$ je tlaková ztráta oleje při průchodu celým systémem olejového okruhu (výměník, sušárna, filtry, armatury, …), $b_{K,P}$ a $c_{K,P}$ jsou koeficienty zohledňující cenový trend investičních nákladů pro olejové čerpadlo. V našem případě byly tyto koeficienty určeny pro cirkulační olejová čerpadla KSB (včetně motoru) s rotační mechanickou ucpávkou. Ceny byly zjištěny poptávkou [76] u společnosti specializované na dodávky ohřevných zařízení nejčastěji pro teplonosný olej. 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 4, který je též možné obecně použít při předběžném určování pořizovacích nákladů na zmíněné olejová čerpadla při znalosti žádaného tlakového spádu (dopravní výšky) čerpadla a objemového průtoku oleje.



Graf 4 Pořizovací náklady na olejové čerpadlo

Celkové fixní náklady tedy můžeme využitím výše uvedených rovnic vyjádřit jako:

$$C_F = a_f \cdot \left(m_E \cdot C_{KG} + b_{K,P} \cdot (V_O \cdot \Delta p_{O,C})^{C_{K,P}} + b_{K,F} \cdot (V_S \cdot \Delta p_{S,C})^{C_{K,F}}\right) \cdot (1+q), \qquad (6\text{-}66)$$

6.5.2 Variabilní náklady

Do variabilních nákladů spadají především provozní náklady. Mezi ty nejdůležitější můžeme z hlediska optimalizace systému předehřevu oleje ve výměníku spaliny/olej považovat zejména zvýšené náklady na provoz ventilátoru a náklady na provoz olejového čerpadla. Určit provozní náklady znamená zejména stanovit cenu za spotřebovanou elektrickou energii, která je spojená se zvýšenou tlakovou ztrátou pro dopravu spalin a s tlakovou ztrátou oleje ve výměníku. Pro variabilní náklady tedy platí:

$$C_V = C_{O,F} + C_{O,P}, \tag{6-67}$$

kde $C_{O,\,F}$ jsou provozní náklady spojené se zvýšenou tlakovou ztrátou spalin a $C_{O,\,P}$ jsou provozní náklady spojené s tlakovou ztrátou oleje ve výměníku. Dle [53] je možné tyto provozní náklady určit ze vztahu:

$$C_O = k_E \cdot \tau_B \cdot P_{eq}, \tag{6-68}$$

kde k_E je cena elektrické energie (pro cementárnu, jakožto většího odběratele, je dle [77] cena elektrické energie možné odhadovat přibližně 1,5 Kč/ kWh, k tomu je však potřebné přičíst cca ½ za distribuci, takže výsledná cena se může pohybovat okolo 2,2 Kč/ kWh (rok odhadu 2008), τ_B je počet hodin roční doby provozu (fond pracovní doby, pro cementárnu se pohybuje okolo 7750 h/rok) a P_{eq} je příkon zařízení (čerpadla či ventilátoru), který určíme jako:

$$P_{eq} = \frac{V \cdot \Delta p_x}{\eta_C}, \tag{6-69}$$

kde V je objemové průtočné množství dopravované tekutiny, Δp_x je tlaková ztráta, pro jejíž hodnotu chceme vyčíslit provozní náklady η_C je celková účinnost soustrojí ventilátor či čerpadla. Ta je dána součinem účinnosti motoru, spojky, je-li součástí, i převodovky a vlastního ventilátoru či čerpadla. S využitím výše uvedených vztahů pak pro variabilní náklady výměníku tepla můžeme psát:

$$C_V = k_E \cdot \tau_B \cdot \left(\frac{V_S \cdot \Delta p_S}{\eta_{C,F}} + \frac{V_O \cdot \Delta p_O}{\eta_{C,P}} \right), \tag{6-70}$$

kde V_S a V_O jsou objemové průtoky spalin (při teplotě spalin ve ventilátoru) a oleje, Δp_S a Δp_O tlakové ztráty spalin a oleje přes výměník a $\eta_{C,\,F}$ a $\eta_{C,\,P}$ jsou celkové účinnosti ventilátoru a čerpadla.

6.5.3 Rovnice celkových nákladů výměníku se svazkem trubek

Po určení rovnic vyjadřujících celkové fixní (6-66) a variabilní (6-70) náklady můžeme dle vztahu (6-56) pro celkové náklady po úpravách psát:

$$C_T = a_f \cdot \left(m_E \cdot C_{KG} + b_{K,P} \cdot (V_O \cdot \Delta p_{O,C})^{C_{K,P}} + b_{K,F} \cdot (V_S \cdot \Delta p_{S,C})^{C_{K,F}}\right) \cdot (1+q) +$$

$$k_E \cdot \tau_B \cdot \left(\frac{V_O \cdot \Delta p_O}{\eta_{C,P}} + \frac{V_S \cdot \Delta p_S}{\eta_{C,F}}\right) \qquad \text{(6-71)}$$

6.6 OPTIMÁLNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU SE SVAZKEM TRUBEK

V následujících kapitolách budou nejdříve určeny a vyjádřeny nezávislé proměnné a následně je naznačen postup optimalizace - postup určení optimální konfigurace výměníku.

6.6.1 Stanovení nezávislých proměnných

Cílem této kapitoly je vyjádřit veličiny obsažené v rovnici (6-71) s pokud možno nejmenším počtem nezávislých parametrů, ze kterých bude možné navrhnout cenově optimální výměník.

Jak bylo zmíněno v kapitole 6.2, optimální návrh výměníku znamená najít minimum celkových nákladů. Výše uvedená rovnice celkových nákladů byla odvozena v předcházející kapitole, jako suma fixních a variabilních nákladů. Z toho důvodu bude hledání nezávislých parametrů dále pomyslně rozděleno do těchto dvou skupin.

Jak můžeme ze zmíněné rovnice pozorovat, na fixní náklady má kromě nákladů pořizovacích na čerpadla, případně ventilátor, rozhodující vliv hmotnost výměníku. Hmotnost výměníku je můžeme říci úměrná ploše výměny tepla A (hmotnost pláště výměníku není též zanedbatelná a je možné ji vyjádřit z nezávislých parametrů určených níže, shrnutých v tab. 14). Plocha výměny tepla A je závislá na intenzitě výměny tepla, především pak na součinitelích přestupu tepla na straně spalin i oleje (α_S, α_O). To je patrné z rovnic (6-23) až (6-29) (rovnic přenosu tepla), neboť teplotní logaritmický spád ΔT_{ln} je v našem případě závislý na typu zvolené sušárny (vstupní teplota oleje t_{O1} se pohybuje okolo 180 °C, výstupní teplota t_{O2} okolo 200 °C), teplota spalin na vstupu je známá, na výstupu vychází z entalpie odebrané spalinám pro požadovaný odpar sušárny. Tato entalpie je tedy rovna i požadovanému tepelnému výkonu výměníku $\dot{Q}$. Pořizující náklady na čerpadla a ventilátor jsou podle vztahů (6-64), (6-65) ovlivněny zejména celkovými tlakovými ztrátami. Tyto celkové ztráty, s výjimkou tlakových ztrát oleje a spalin přes výměník, můžeme pro daná průtočná množství považovat za neproměnné, pro optimalizaci tedy prvky bez nezávislých parametrů.

U variabilních nákladů, sestávajících se z nákladů provozních, jsou hlavními ovlivňujícími parametry tlakové ztráty, a to na straně spalin i oleje (Δp_S, Δp_O).

Při uvážení výše uvedeného tedy můžeme pro stanovení nezávislých proměnných vycházet ze čtyř hlavních parametrů, ovlivňující celkové náklady, kterými jsou:

a) součinitel přestupu tepla na straně spalin α_S
b) součinitel přestupu tepla na straně oleje α_O
c) tlaková ztráta na straně spalin Δp_S
d) tlaková ztráta na straně oleje Δp_O

ad a) Pokud se blíže podíváme na součinitel přestupu tepla na straně spalin α_S, vyjádřeným rovnicí (6-45), je patrné, že součinitel přestupu tepla spalin je závislý kromě známých hodnot termofyzikálních vlastností spalin - ρ_S, η_S, λ_S, cp_S a středních teplot T_W a T_S, zejména na vnějším průměru potrubí d, poměrech geometrického uspořádání - a, b a rychlosti spalin ve volném průřezu výměníku - c_V.

Poměry geometrického uspořádání a, b můžeme s využitím rovnic (6-1), (6-2) a vztahu (6-4) platném při uvažovaném vystřídaném uspořádání s vrcholovým úhlem 60°, vyjádřit pouze v závislosti na příčném poměru a.

Na rychlost spalin ve volném průřezu je možné též při uvážení rovnice kontinuity a znalosti objemového průtoku spalin pohlížet jako na neznámou veličinu průtočného průřezu, respektive jako na neznámé rozměry stran výměníku - x, y, podle vztahu:

$$c_V = \frac{V_S}{x \cdot y}, \tag{6-72}$$

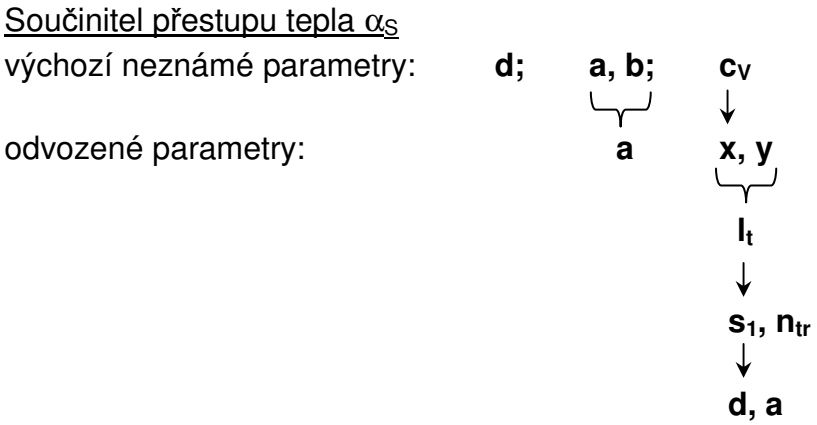
kde V_S je známý objemový průtok spalin při střední teplotě (t_S) spalin ve výměníku a x, y jsou rozměry stran volného průtočného průřezu výměníku.

Protože nezávislých proměnných je poměrně vysoký počet a optimalizace by byla značně náročnější a také z důvodů konstrukčních bylo počítáno se čtvercovým průřezem výměníku, u kterého je též možné počítat s rovnoměrnějším rozdělením toku spalin. Pro jeho strany pak platí x=y. Jak je možné vidět na obr. 21, je jedna strana výměníku přibližně rovna délce trubky l_t, tedy $x=l_t$. Zároveň je možné stranu výměníku x a tedy i délku trubky l_t stanovit ze vztahu:

$$x = l_t = s_1 \cdot (n_{tr} + 0{,}5), \tag{6-73}$$

kde s_1 je příčná rozteč trubek a n_{tr} je počet trubek v řadě. Příčná rozteč s_1 je dle vztahu (6-1) závislá na vnějším průměru d a příčném poměru a.

Pro přehlednost je výše uvedený postup odvození nezávislých parametrů z rovnice součinitele přestupu tepla za využití známých a dopočítaných hodnot zobrazen v následujícím přehledu:



ad b) Druhým rozhodujícím parametrem ovlivňujícím fixní, resp. investiční náklady na výměník je součinitel přestupu tepla na straně oleje. Ten je vyjádřený v rovnici (6-50), ze které můžeme vyčíst jeho funkční závislost kromě termofyzikálních vlastností oleje na vnitřním průměru d_i, rychlosti oleje v trubkách c_O a délce trubky l_t.

Vnitřní průměr d_i je možné vyjádřit ze známé relace k vnějšímu průměru jako:

$$d_i = d - 2 \cdot t \,, \tag{6-74}$$

kde t je tloušťka stěny trubky, odpovídající zvolenému standartnímu rozměru trubek. Při znalosti tloušťky stěny t trubky tedy vnitřní průměr d_i můžeme vyjádřit v závislosti na vnějším průměru d. Při využití uvedeného vztahu můžeme i rychlost oleje v trubkách vyjádřit v závislosti na vnějším průměru d. Při znalosti potřebného množství oleje je tato rychlost funkcí počtu trubek v řadě a počtu řad jednoho chodu, a vnějšího průměru podle vztahu:

$$c_O = \frac{V_O}{r \cdot n_{tr} \cdot S_t} = \frac{V_O \cdot 4}{r \cdot n_{tr} \cdot \pi \cdot (d - 2t)^2} \,, \tag{6-75}$$

kde r je počet řad jednoho chodu. Tento parametr bylo nutné zavést z toho důvodu, že množství oleje, které je potřebné je velké a počet proudů není možné umístnit do jedné řady trubek, tak, aby nevznikl výměník poněkud široký, či s velkými průměry trubek nevhodnými z hlediska přestupu tepla na straně spalin i celého designu optimálního výměníku.

V_O, průtočné množství oleje, stanovíme z rovnice:

$$V_O = \frac{m_O}{\rho_O} = \frac{\dot{Q}}{\rho_O \cdot cp_{SO} \cdot \Delta T_O}, \qquad (6\text{-}76)$$

kde m_O je průtočné množství oleje, ρ_O hustota oleje určená při střední teplotě oleje t_O, $\dot{Q}$ tepelný výkon výměníku, který je roven tepelnému toku potřebnému pro usušení uvažovaného množství kalu (viz kapitola 4.1), cp_{SO} střední měrná tepelná kapacita oleje a ΔT_O teplotní gradient oleje.

Délku trubky l_t můžeme stejně, jak tomu bylo u součinitele přestupu tepla vyjádřit v závislosti na počtu trubek v řadě, příčném poměru a vnějším průměru (viz odvození z rovnice (6-73)).

Pro přehlednost je uveden popsaný postup odvození nezávislých parametrů v následujícím přehledu:

<u>Součinitel přestupu tepla α_O</u>

výchozí neznámé parametry:	**d_i;**	**l_t;**	**c_O**
	↓	↓	↓
odvozené parametry:	**d**	***s_1, n_{tr}***	**d, r, n_{tr}**
		↓	
		d, a	

ad c) Z rovnic (6-10) a (6-12), jsou patrné jednotlivé parametry ovlivňující tlakové ztráty spalin. Jsou to fyzikální vlastnosti spalin - ρ_S, η_S, $\eta_{S,W}$, vnější průměr trubek d, rychlost ve volném průřezu výměníku c_V, poměry geometrického uspořádání a, b a počet řad trubek N_R.

Stejně, jak tomu bylo u součinitele přestupu tepla na straně spalin (viz výše), rychlost spalin ve volném průřezu můžeme převést na neznámý příčný poměr, vnější průměr trubek a počet trubek v řadě. Poměry geometrického uspořádání a, b můžeme opět vyjádřit pouze v závislosti na příčném poměru a (viz výše).

Počet řad N_R můžeme s využitím rovnic pro přestup tepla (viz kapitola 6.3.2), převést podle vztahů:

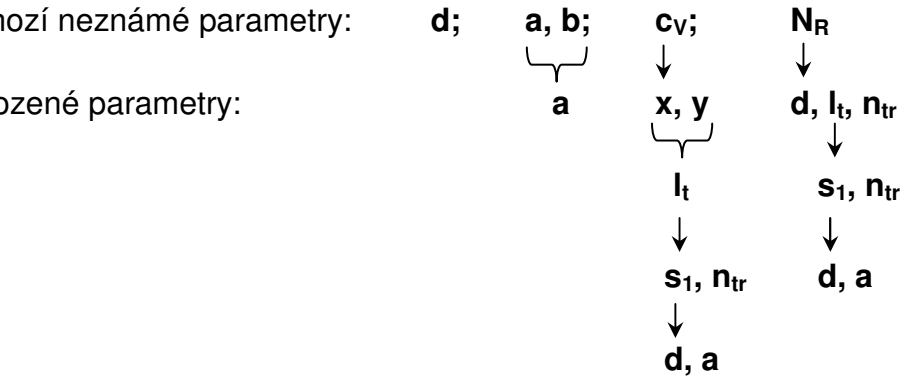
$$N_R = \frac{n_t}{n_{tr}} \quad \text{a} \quad n_t = \frac{A}{A_t} \qquad (6\text{-}77)\ (6\text{-}78)$$

$$\Rightarrow \quad N_R = \frac{A}{\pi \cdot d \cdot l_t \cdot n_{tr}}, \qquad (6\text{-}79)$$

kde n_t je celkový počet trubek ve výměníku, A je plocha výměny tepla (získáme z rovnice (6-23)) a A_t je plocha výměny tepla jedné trubky s průměrem d a délce l_t. Délku trubky l_t můžeme opět s výhodou vyjádřit v závislosti na vnějším průměru, příčném poměru a počtu trubek v řadě, viz odvození z rovnice (6-73).

Pro přehlednost schematicky zobrazíme výše uvedený postup:

<u>Tlaková ztráta spalin Δp_S</u>



ad d) Jak je patrné z rovnice (6-22), celková tlaková ztráta výměníku na straně oleje je kromě termofyzikálních vlastností oleje (ρ_S, η_S - hustoty a dynamické viskozity), drsnosti potrubí k a sum součinitelů místních odporů $\xi_{O,T}$, $\xi_{O,PR}$, funkcí, vnitřního průměru potrubí d_i, rychlosti oleje v trubkách c_O, celkové délky trubky v rámci jedné sekce l_{tc} a počtu sekcí N_S.

Vnitřní průměr, jak je popsáno výše, je funkcí vnějšího průměru trubek d. Rychlost oleje v trubkách je závislá na počtu trubek v řadě, počtu řad jednoho chodu a na vnějším průměru d (viz ad a)).

Pokud uvažujeme jednotlivé sekce s tvarem U - trubek, můžeme pro celkovou délku trubky v rámci jedné sekce uvažovat:

$$l_{tc} = 2 \cdot l_t , \tag{6-80}$$

kde l_t je délka trubky, kterou opět můžeme převést v závislosti na vnějším průměru, příčném poměru a počtu trubek v řadě.

Počet sekcí N_S můžeme vyjádřit vztahem:

$$N_S = \frac{N_R}{2 \cdot r}, \tag{6-81}$$

kde N_R je počet řad vyjádřený výše a při převedení závislý na vnějším průměru příčném poměru a počtu trubek v řadě, r je počet řad jednoho chodu.

Stanovení nezávislých parametrů z výchozí rovnice (6-22), můžeme schematicky znázornit jako:

Tlaková ztráta oleje Δp_O

výchozí neznámé parametry: **d_i; l_t; c_O; N_S**

odvozené parametry: **d** **s_1, n_{tr}** **d, r, n_{tr}** **N_R, r**

d, a

d, l_t, n_{tr}

s_1, n_{tr}

d, a

Výsledné nezávislé parametry jsou shrnuty v následující tab. 14 s rozdělením k příslušným fixním a 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. 14 Výsledné, nezávislé optimalizační parametry

6.6.2 Určení optimální konfigurace výměníku

Z výsledků předchozí kapitoly, uvedených v souhrnné tab. 14, vyplývá, že navržení optimální konfigurace výměníku můžeme převést na hledání takových hodnot d, a, n_{tr}, r (vnějšího průměru trubky, příčném 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. 14) proměnnými. Účelová funkce vychází z rovnice (6-71) a jak je níže uvedeno, zejména z důvodu rozsáhlosti, není zde 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:

$$C_T = f\left(d, a, n_{tr}, r\right) \tag{6-82}$$

Pro řešení optimalizační úlohy byly uvažovány následující omezující podmínky:

- $d \in \langle 27,114 \rangle \, mm$ - Vnější průměr d byl volený podle standartní řady rozměrové normy trubek ANSI B36.10, tloušťka stěny t, průměru odpovídající, standartní.
- $a \in \langle 1{,}5;3 \rangle$ - příčný poměr uspořádání volen v oblasti jeho platnosti (viz obr. 24).
- $l_t = d \cdot a \cdot \left(n_{tr} + 0{,}5\right) \leq 2{,}3m$ - 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_{tc}
- $c_O \in \langle 1,4 \rangle$ - 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.
- $\Delta p_S \leq 1050\,Pa$ - Jak bylo uvedeno v kapitole 6.5.1 má instalovaný ventilátor využitelnou rezervu na tlaku cca 1000 Pa. Tato hodnota s tolerancí +5 % byla též stanovena jako omezující podmínkou, 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 při postupném dosazování vztahů uvedených v předešlých kapitolách a vztahů pro určení hmotnosti výměníku (pro lepší přehlednost nebyly již v textu uvedeny) do rovnice pro celkové (roční) náklady (6-71). V našem případě však funkce 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 nespojité, 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 umístnit všechny proudy oleje do jedné řady trubek, pokud chceme zachovat reálné rozměry výměníku. Proto není možné s využitím derivací, pro hledání extrémů funkcí, najít minimum této funkce.

Z výše uvedených důvodů byla provedena optimalizace metodou tzv. dichotomického hledání [50], 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. 15 a tab. 16.

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. 15 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	2 111	tis. Kč/ rok

Tab. 16 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.

Nalezený výměník s optimální konfigurací, by byl velikostně srovnatelný s výměníkem na následujícím obr. 30.



Obr. 30 Výměník tepla spaliny/ vzduch s „dvojitým svazkem U-trubek“ [78]

7 EKONOMICKÁ ANALÝZA

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

Abychom však tento předpoklad podložili číselnými hodnotami, musíme provést ekonomickou analýzu provozu. Skutečný dopad investice na hospodaření podniku ve stanovené ekonomické době životnosti 15 let se může od hodnot výsledků analýzy lišit. Důvod je takový, že v časovém horizontu patnácti let nedokážeme zcela přesně určit náklady (ceny za energie, dopravu, diskontní sazbu, rozdílné náklady na údržbu, situace podniku…) a s tím související výsledné úspory.

Stejně jak tomu bylo u výměníku tepla v kapitole 6.5, také pro celkové náklady celého projektu je možné využít obecnou rovnici celkových nákladů (6-56), vyjádřených jako sumu fixních a variabilních nákladů. Hlavní položku fixních nákladů tvoří náklady investiční, u variabilních nákladů jsou to zejména náklady provozní. Oběma nákladům a s nimi souvisejícím úsporám jsou věnovány následující kapitoly 7.1a 7.3.1.

7.1 INVESTIČNÍ NÁKLADY PROJEKTU - N_{IP}

Investiční náklady hrají při bilancování ekonomické stránky projektu velmi významnou roli. Z tohoto důvodu je při určování ekonomických parametrů a ukazatelů efektivnosti investice potřebné vědět, s jakou přesností byly celkové investiční náklady projektu uvažovány.

Podle [71] in [79] můžeme odhady investičních nákladů rozdělit podle typu, resp. přesnosti, na různé účely použití podle následující tabulky:

Odhad	Přesnost	Použití
Hrubý (řádový)	10 - 50%	předběžná volba procesu
Pro studie	30%	studie proveditelnosti
Předběžný	20%	předběžný rozpočet
Konečný	10%	řízení projektu
Detailní	5%	pro dodavatele / kontraktora

Tab. 17 Typy a přesnost odhadů [79]

Při odhadu investičních nákladů je pak nutné počítat s velkým množstvím různorodých položek, jak můžeme pozorovat v následující tab. 18, a proto je přesný odhad investic časově a finančně značně náročný [79].

1) technologické zařízení
2) potrubí a armatury
3) izolace (včetně vyzdívek pecí)
4) ocelové konstrukce (nosné a obslužné plošiny)
5) montáže
6) elektroinstalace silnoproudé a slaboproudé
7) měřicí a regulační přístroje
8) nátěry
9) lešení
10) stavba provozních budov (včetně základů ocelových konstrukcí)
11) zdravotechnika
12) vzduchotechnika
Pokud se nejedná pouze o výrobní jednotku v rámci podniku, ale o stavbu „na zelené louce“, připojují se ještě další náklady:
13) úpravy terénu (včetně oplocení)
14) silnice
15) silno a slaboproudé rozvody
16) technologické rozvody (páteřní potrubní mosty)
17) rozvody vod a kanalizace
18) železniční vlečky
19) mechanické dílny (údržba)
20) energetická zařízení (elektrárna, trafostanice)
21) sklady surovin a produktů
22) laboratoře
23) sociální zařízení (šatny, jídelna)
24) administrativní budova
K vlastním nákladům na výstavbu výrobní jednotky (závodu) je ještě nutno připočítat projekční náklady a další poplatky včetně finanční rezervy a pojištění.

Tab. 18 Náklady na výstavbu nové výrobní jednotky [79]

V našem případě se nejedná o stavbu „na zelené louce“, pro odhad tedy přibližně platí v tabulce označené položky pod čísly 1 až 12.

Vedle na první pohled nejvíce patrných investičních nákladů, za které můžeme považovat náklady na strojní část technologie, tvoří ve výsledných nákladech nemalý

podíl ostatní položky, jak je např. vyjmenovává výše uvedená tab. 18. Přesný odhad těchto nákladů je však komplikovanější než odhad ceny zařízení, je však možné tyto položky určovat v poměrném vztahu k nákladům na strojní část technologie [79]. Metody založené na tomto principu můžeme obecněji rozdělit do tří skupin, podle toho, zda se náklady na tyto položky z nákladů na strojní část odhadují jako:

a) násobek ceny strojního zařízení (autoři metod: Land, Hand)
b) pomocí faktorů pro jednotlivé položky (Sinnott)
c) pomocí faktorů pro jednotlivé typy zařízení (Guthrie).

V literatuře [79] je poukázáno na hlavní nedostatek těchto běžně užívaných metod, zejména, že odhad nevychází ze složitosti technologie, rozsahu stavební části a dalších prvků často významně ovlivňujících konečnou cenu, ale pouze z ceny za strojní část. Souvislost mezi těmito náklady sice je možné nalézt, ale pouze v podmínkách dlouhodobě ustáleného a velkého trhu. Hodnoty faktorů se navíc liší podle místních podmínek (zejména ceny materiálu, práce).

Faktory ve zmíněných metodách se pohybují v poměrně širokém rozmezí od 2 až do 4,9 pro nové jednotky, a pro uvedené příklady rekonstrukce od 2 do 4. V našem případě pro stanovené ostatní položky vychází faktor 2, tedy že celkové náklady projektu činí přibližně dvojnásobek nákladů na technologické zařízení.

V závěru zmíněné práce je však uvedené, že odhad nákladů založený pouze na publikovaných podkladech je velmi nepřesný a odhad nákladů na jeho instalaci a na další položky, které na ceně zařízení ve skutečnosti nezávisí, by měl spíše místo publikovaných faktorů vycházet ze skutečného rozsahu, cen materiálu a práce běžných pro daný podnik.

Je tedy zřejmé, že určit přesnost investičních nákladů je poměrně obtížný úkol, který však má pro posouzení ekonomického efektu projektu zásadní vliv.

Abychom dosáhli reálného obrazu o výsledném posouzení efektivnosti 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.

Stanovení investičních nákladů bylo z důvodů lepší orientace pomyslně rozděleno na dva samostatné celky - „horkou“ a „studenou“ část. V „horké“ části jsou zahrnuty zařízení a jednotlivé prvky olejového okruhu, „studená“ část obsahuje všechny zařízení spojené se zpracováním a dopravou kalu, ať vlhkého či suchého. V souhrnu je tedy možné uvažované položky investičních nákladů znázornit přehledem, jak ukazuje následující tab. 19.

Položka	Část inv. celku	Zahrnuté náklady
Strojní část	Horká část	*Výměník spaliny/ olej;* *skladovací, expanzní a záchytná nádrž oleje;* *oběhová a manipulační čerpadla oleje;* *potrubí;* *armatury navrženého olejového okruhu;* *olejová náplň;* *izolace;*
	Studená část	*Disková rotační sušárna kalu se systémem šnekových dopravníků (včetně výstupního vodou chlazeného) a přístupových plošin;* *sběrná násypka;* *zásobník odvodněného kalu pro cca 300 tun;* *čerpadlo kalu;* *cyklón;* *kondenzátor;* *ventilátor (pro odvod plynů ze sušárny);* *čerpadlo pro přívod tlakové vody;* *fluidní doprava usušeného kalu;* *potrubí (kalu, par, vody);* *potřebné izolace;* *spojovací materiál*
Elektro část část Měření a regulace (MaR)	Horká část	*elektro rozvody s měřením a regulací olej. okruhu (teplota, tlak, průtok, měření hladiny)*
	Studená část	*Měření a regulace sušárny (otáčky motoru - řízení množství kalu v sušárně, vážící buňky - kontrola množství a hladiny kalu v sušárně, měření teploty produktu-kalu a par na výstupu, měření podtlaku v sušárně, chlazení převodovky, měření obsahu kyslíku); Elektrický a měřící panel (ovládání startérů motoru a měničů)*
Stavební část	Horká část	*Nevyhřívaná budova olejového okruhu*
	Studená část	*Nevyhřívaná budova technologie sušení kalů*
Ostatní	Horká i Studená část	*Basic engineering a general services sušárny; montáž; nátěry; rezervy; honorář*

Tab. 19 Zahrnuté investiční náklady projektu

Širší přehled měření a regulace olejového okruhu viz příloha 8, přehled a ocenění jednotlivých armatur viz příloha 9. Protože nebylo zjištěno, zda by zařízení sušárny a olejového okruhu mohlo být umístněno do prostorů budov (hal), kterými cementárna disponuje, byly do pořizovacích nákladů jako alternativa zahrnuty náklady na stavební část „horké“ i „studené“ části technologie.

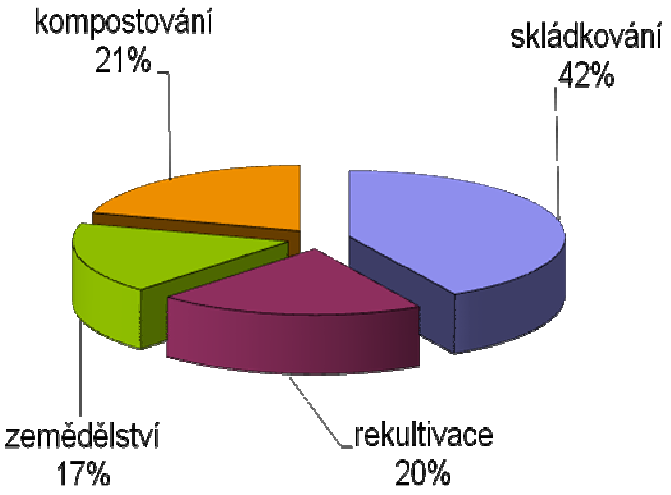
Jak je uvedeno pod položkou ostatní v tab. 19, k nákladům byl započten také honorář dle ČKAIT (Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě) vypočítaný jako procentuální část započitatelných nákladů. Honorář slouží k pokrytí nákladů, jako jsou např. náklady na vypracování dokumentace pro řízení (stavební, územní), dokumentace pro provedení a zadání stavby, spolupráci při výběru dodavatele, autorský a technický dozor či ukončení stavby a uvedení do provozu. Podrobnější ocenění jednotlivých zařízení a ostatních položek zahrnutých do investičních nákladů viz příloha 8 až příloha 10.

7.2 CENY ZA ZPRACOVÁNÍ KALU

V následujících dvou kapitolách je popsán postup určení konečné „ceny“ kalu pro cementárnu, za kterou jej zpracovává. Tato konečná cena souvisí především s cenami jednotlivých čistíren za likvidaci či využití kalů a s náklady za jejich dopravu do cementárny.

7.2.1 Náklady ČOV v okolí cementárny na zpracování kalů

Jak bylo zmíněno v kapitole 4.1, za účelem získání podkladů pro reálné posouzení myšlenky zpracování kalů v cementárně, byly kontaktovány formou dotazníku čistírny v 50km okruhu cementárny. Dotazník mimo jiné obsahoval otázku o spolupráci, po jejíž kladné odpovědi (o potencionálním zapojení se v případě realizace projektu), byla zpracována databáze informací o těchto čistírnách. Údaje byly získány z třicetišesti čistíren odpadních vod, z nichž na základě analýzy bylo vybráno dvacet vhodných, především s vyšším obsahem sušiny v kalu a vyšší celkovou produkcí kalu (viz příloha 1). Celkové množství sušiny kalu těchto dvaceti vybraných čistíren je cca 9 000 t/ rok, průměrná sušina kalu po odvodnění se pohybuje okolo 22 %. Jak se kaly v těchto zmíněných čistírnách zpracovávají, ukazuje graf 5.



Graf 5 Zpracování kalů z ČOV v okolí cementárny (2002)

Náklady na využití či likvidaci kalů oslovených ČOV se pohybují v následujících cenových relacích (2002):

- přímá aplikace na zemědělskou půdu 0 až 150 Kč/t
- kompostování 150 až 500 Kč/t
- ukládání na skládky
  - kategorie „ostatní odpad“ 500 Kč/t
  - kategorie „nebezpečný odpad“ 4500 Kč/t

7.2.2 Stanovení ceny (benefitu) za spalovaní kalů

Abychom mohli vyhodnotit provozní úspory vyplývající ze spalování dovozeného a usušeného kalu v cementárně, je potřebné stanovit cenu kalu, za kterou bude cementárna tento koncový produkt ČOV spalovat. Jak je uvedeno v kapitole 7.2, parametry, které mají dominantní vliv na cenu kalu, jsou náklady na dopravu a náklady ČOV na zpracování kalu.

Pro stanovení nákladů na dopravu byl uvažován transport v nákladních automobilech s nosností 10 a 22 tun (nákladní automobil s vlekem). Množství dopravovaných kalů je značné, z toho důvodu je možné očekávat při dlouhodobější smlouvě dohodnuté nižší ceny za dopravu. Průměrná cena za dopravu zjištěná od několika ČOV za jeden km, závisející na dopravci a velikosti nákladu, se pohybuje v rozmezí hodnot cca 24 Kč/ km za desetitunový kontejner až 30 Kč/km za soupravu s vlekem, na kterou je možné naložit až 25 tun kalu. Při rozvaze byla uvažována cena za dopravu desetitunového nákladu 22 Kč/km, a za dopravu 22t kalů (souprava s vlekem) 25 Kč/km. Jednotlivé vzdálenosti konkrétních ČOV od cementárny byly zjištěny vyhledáváním s pomocí elektronických map jako např. [80] V ceně za dopravu kalu z ČOV do cementárny byla do ujeté vzdálenosti započítána i cena za přistavení a odstavení autodopravy (autodopravce uvažován z Pardubic, které byly zvoleny z důvodu, že jsou větší město s předpokladem existence potenciálního dopravce). O tom, jaký vliv na výsledný ekonomický přínos má změna uvažovaných cen za dopravu a či dopravce přímo z Prachovic (uvažování pouze cesty tam a zpět - bez přistavení a odstavení vozidla) zmiňuje kapitola 7.6.5.

Náklady na dopravu odvodněných kalů vyvažují zisky od jednotlivých ČOV plynoucí za zneškodnění kalu, jakožto odpadu. Aby však byla spolupráce s cementárnou pro ČOV zajímavá, bylo počítáno pro konkrétní ČOV vždy s nižšími cenami za likvidaci, než jaké za ně v současnosti vydávají (viz předchozí kapitola).

Z hlediska provozně ekonomického se cena paliva nevyjadřuje v závislosti na hmotnosti, neboť ta je z hlediska úspor na palivu nevypovídající, ale v závislosti na množství vneseného tepla, respektive ceně jednoho GJ tepla vneseného do procesu. Tuto závislost můžeme určit při znalosti výhřevnosti paliva (viz kapitola 3.2.2).

Při znalosti těchto parametrů tedy pro výslednou cenu kalu jako paliva pro cementárny můžeme psát:

$$C_K = \frac{N_D - Z_L}{LHV_V \cdot m_{SK,V} + LHV_S \cdot m_{SK,S}}, \tag{7-1}$$

kde N_D celkové roční náklady na dopravu (na dopravení kalů ze všech ČOV), Z_L jsou roční zisky vyplývající z likvidace (resp. materiálového a energetického využití) kalů daným ČOV, LHV_V je výhřevnost vyhnilých kalů vysušených v sušárně (cca 90 % sušiny), LHV_S totéž, týkající se kalů surových, $m_{SK,V}$ roční množství usušených kalů vyhnilých, $m_{SK,S}$ surových.

Z celkové bilance vyplývá, že i v případě, kdy by náklady na dopravu převýšily zisk z poplatků za likvidaci, vyplatí se často kal v cementárně spalovat. Je to dáno cenou energie získané spálením kalů, která je stále nižší než cena energie získané spálením uhlí.

Pro účely stanovení ceny paliva byla pro usušený surový kal uvažována průměrná hodnota 16,4 MJ/kg, pro vyhnilý, jehož výhřevnost je nižší vzhledem k nižšímu podílu organické hmoty, 9,6 MJ/kg.

Pro uvedené parametry dopravy a uvedených výhřevností vychází pro usušený kal ze zmíněných čistíren cena:

$$C_K = -98 \frac{Kč}{GJ}, \tag{7-2}$$

Znaménko mínus před výslednou cenou nás upozorňuje, že spálením 1GJ tepla cementárna získá 98 Kč, neboť celkové náklady na dopravu jsou nižší než zisk z likvidace (využití) kalů.

7.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY PROVOZU

Pro určení provozních nákladů, resp. úspor při využití kalů bylo vycházeno zejména z provozních hodnot komplexního měření linky výpalu slinku této cementárny [49]. Základní uvažované parametry provozu je možné pozorovat z následující tabulky:

Parametr	Jednotka	Hodnota
Tepelný výkon rotační cementárenské pece	MW	116
Produkce slinku	t/h	123,5
Měrná spotřeba tepla na 1t vyrobeného slinku	GJ/ t	3,38
Podíl tepla vneseného spalováním čer. uhlí	%	86,8
Podíl tepla vneseného alternativními palivy	%	13,2
Roční doba provozu (pracovní fond)	h	7750

Tab. 20 Základní parametry provozu cementárny

Jako hlavní palivo se v uvažované cementárně používá drcené černé uhlí. Jako alternativní paliva byly použity alternativní kapalná paliva - z vneseného tepla činí 5,5 % (zejména odpadní topné oleje) a tuhá topná směs činí zbylých 7,7 % vneseného tepla (zejména drcený textil, guma, papír, PET lahve). Tyto zmíněné paliva jsou spalovány v kombinovaném hořáku Unitherm, viz příloha 11. V roční době provozu je zahrnuta pravidelná cca 6týdenní odstávka cementárny.

7.3.1 Náklady a úspory ročního provozu

Při výpočtech úspor plynoucích ze spalování kalů bylo uvažováno s tím, že teplo uvolněné spalováním čistírenských kalů nahradí část tepla vneseného základním palivem - černým uhlím.

Rozdíl celkových nákladů při provozu bez a se spalováním sušených čistírenských kalů nám dává hodnotu celkových ročních provozních úspor. Platí pro ně tedy:

$$U_{CP} = N_{P,B} - N_{P,SK}\,, \tag{7-3}$$

kde U_{CP} jsou celkové provozní úspory, $N_{P,B}$ jsou běžné provozní náklady a $N_{P,SK}$ jsou provozní náklady při spalování kalů sušených v nově uvažované technologii.

Do původních provozních nákladů jsou zahrnuty pouze položky nákladů za palivo, tedy:

$$N_{P,B} = N_U + N_{KA} + N_{TA}\,, \tag{7-4}$$

kde N_U jsou náklady na uhlí, N_{KA} náklady na kapalná alternativní paliva, N_{TA} náklady na tuhá alternativní paliva.

Náklady na jednotlivá paliva můžeme určit jako:

$$N_U = \left(LHV_U \cdot m_U \cdot C_U\right) \cdot \tau_{R,U} \quad , \tag{7-5}$$

$$N_{KA} = \left(LHV_{KA} \cdot m_{KA} \cdot C_{KA}\right) \cdot \tau_{R,KA} \ , \tag{7-6}$$

$$N_{TA} = \left(LHV_{TA} \cdot m_{TA} \cdot C_{TA}\right) \cdot \tau_{R,TA} \quad , \tag{7-7}$$

kde LHV_U je výhřevnost uhlí, m_U hodinové množství černého uhlí, C_U cena paliva (vyjádřená jako cena vneseného tepla), analogicky u položek s indexem KA- označení kapalných alternativních paliv a TA - tuhých alternativních paliv, τ_R s příslušným indexem je roční doba provozu pro dané palivo. Hodinové náklady na jednotlivá paliva můžeme vidět v následující tab. 21.

palivo	Φ výhřevnost	množství	vnesené teplo	cena paliva	cena tepla
	[GJ/t]	[t/h]	[GJ/h]	[Kč/GJ]	[Kč/h]
černé uhlí	26,45	13,7	362,4	80	28 989
kap. odpad	19	1,7	32,3	50	1 615
tuhá směs	14,29	1,6	22,9	20	457
celkem		17	417,5		31 061

Tab. 21 Hodinové náklady na palivo bez spalování kalů

Provozní náklady při uvažované technologii sušení a spalování kalů můžeme vyjádřit vztahem:

$$N_{P,SK} = N_U + N_{KA} + N_{TA} + N_{SK} \ , \tag{7-8}$$

kde N_{SK} jsou veškeré náklady spojené se sušeným kalem, které určíme jako:

$$N_{SK} = N_{SK,P} + N_E + N_{UDR} - U_S \ , \tag{7-9}$$

kde $N_{SK,P}$ jsou náklady na kal, jakožto palivo, N_E náklady na elektrickou energii celé technologie sušení kalů, N_{UDR} náklady na údržbu a opravy, U_S jsou úspory za surovinu.

Náklady na kal, jakožto palivo určíme z rovnice:

$$N_{SK,P} = \left((LHV_V \cdot m_{SK,V} + LHV_S \cdot m_{SK,S}) \cdot C_K\right) \cdot \tau_{R,SK} \ , \tag{7-10}$$

kde mimo již výše uvedené veličiny, $\tau_{R,SK}$ je roční doba provozu se sušeným kalem. Uvažujeme-li konstantní množství celkového tepla vneseného do rotační pece,

potom se množství černého uhlí (a tedy i náklady N_U) úměrně sníží o hodnotu, odpovídající teplu vneseného spálením kalů, jak je možné vidět v následující tab. 22.

palivo	Φ výhřevnost	množství	vnesené teplo	cena paliva	cena tepla
	[GJ/t]	[t/h]	[GJ/h]	[Kč/GJ]	[Kč/h]
černé uhlí	26,45	13,2	350,2	80	28 016
kap. odpad	19	1,7	32,3	50	1 615
tuhá směs	14,29	1,6	22,9	20	457
kal z ČOV	10,76	1,13	12,2	-98	-1 192
celkem		17,7	417,5		28 896

Tab. 22 Hodinové náklady na palivo při spalování čistírenských kalů

Pro uvažované hodnoty výhřevnosti kalu a černého uhlí platí, že teplo získané spálením 1 tuny čistírenských kalů nahradí teplo uvolněné při spálení cca 0,4 t černého uhlí.

Náklady na elektrickou energii určíme jako:

$$N_E = (k_E \cdot \sum P_{eq}) \cdot \tau_{R,SK}\,, \tag{7-11}$$

kde k_E je cena elektrické energie, výraz ΣP_{eq} vyjadřuje součet příkonů veškerých nově instalovaných elektrických zařízení technologie sušení (čerpadla oleje, kalu,…) a zvýšené příkon spalinového ventilátoru cementárny, viz rovnice (6-69).

Roční náklady na údržbu jsme uvažovali jako 0,8% z investičních nákladů, tedy:

$$N_{UDR} = N_{IP} \cdot 0{,}008\,, \tag{7-12}$$

kde N_{IP} jsou investiční náklady projektu.

Poslední neurčenou položkou tvoří úspory za surovinu - U_S, které vyplývají z částečného nahrazení vstupní suroviny popelem z kalu. Díky obdobnému složení (viz

obr. 11 [45] a tab. 5 [31]), může 1 tuna sušených kalů nahradit až 1/3 tuny vstupní suroviny pro výpal slinku. Pro úspory za surovinu můžeme tedy psát:

$$U_S = \frac{m_{SK,V} + m_{SK,V}}{3} \cdot C_S\,, \tag{7-13}$$

kde C_S je cena vstupní suroviny pro výpal slinku, která se dle [81] pohybuje okolo hodnoty 60 Kč/t.

7.4 BANKOVNÍ ÚDAJE - CENA PENĚZ

Pro vytvoření následujících kapitol ekonomické analýzy byly jako podklady použity zejména literární zdroje [82] a [83].

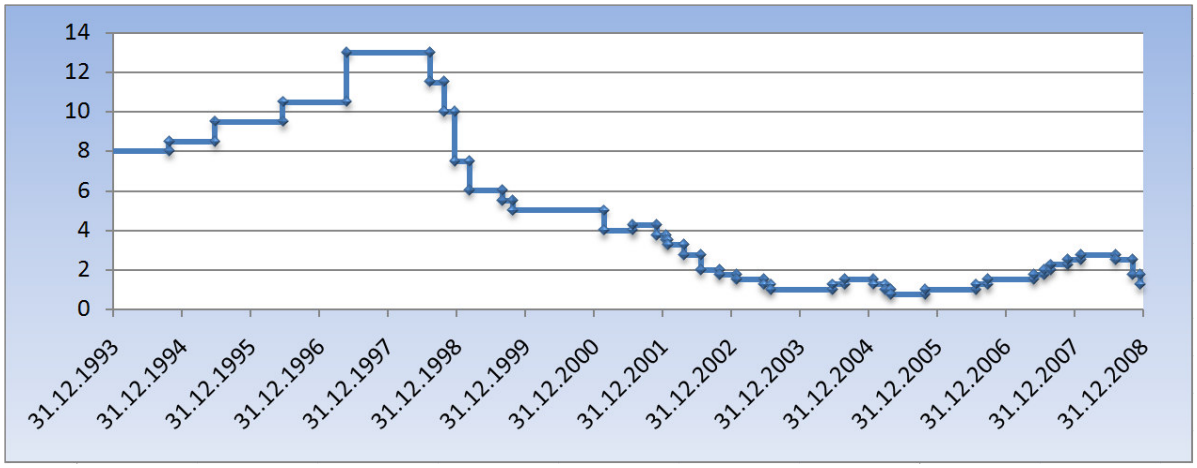
Během doby životnosti zařízení (15 let), pro kterou je analýza provedena se mění cena peněz, museli jsme proto hodnotu peněz v budoucnosti přepočítat na tzv. současnou hodnotu.

Využili jsme k tomu diskontní sazbu (míru), kterou jsou diskontovány (přepočítány) budoucí peněžní toky na současnou hodnotu [84]. Je to zároveň úroková míra, za kterou mohou komerční banky získat od centrální banky úvěr. V našem případě jsme ji určili jako hodnotu uvedenou českou národní bankou (ČNB). Sazba je platná ode dne vyhlášení do příští změny. V poslední době se diskontní sazba pohybuje okolo 2%.

Hodnota může být odvozena z míry inflace, výnosů z vládních cenných papírů, nebo úroků z dlouhodobých depozit. Investor si ji však může určit sám, podle subjektivních faktorů (podle toho, jakou výnosnost investice předpokládá), které v ní nemusí být zohledněny. Diskontní sazbu lze vyjádřit i jako procentní výšku úroku, o kterou se peníze znehodnotí (zhodnotí). Lze si ji také představit jako hodnotu peněz, o kterou investor přichází investicí daného obnosu, ze kterého např. mohl pobírat úrok (při nákupu akcií pobírat dividendy…), nebo jiným způsobem obnos zhodnotit. Pro přepočet hodnoty peněz na tzv. současnou hodnotu byl potom použit vztah:

$$H_0 = \frac{H_j}{(1+r_d)^j} \quad , \tag{7-14}$$

kde H_0 je současná hodnota hotovosti, j počet roků, H_j hodnota hotovosti, získaná za j roků a r_d diskontní sazba (bezrozměrná, bývá vyjádřena i v procentech - viz graf 6).



Graf 6 Vývoj diskontní sazby ČNB [%] za posledních 15 let [85]

7.5 EKONOMICKÁ ANALÝZA Z POHLEDU PROJEKTANTA A INVESTORA

Ekonomická analýza byla provedena z pohledu projektanta i investora. Pohled projektanta (pohled projektu) je důležitý především při získávání úvěru u bankovních institucí. Z pohledu investora je však vidět celkový dopad investice (kladný nebo záporný) na hospodaření celého podniku (v souvislosti vazeb podnik-stát, podnik-banka) a je tedy objektivnější.

7.5.1 Pohled projektanta

Pohled projektanta je zaměřen pouze na samotnou investici, bez vazeb podniku na stát či banku. Jeho hodnoty vycházejí příznivěji, než je reálný výsledek pro hospodaření podniku.

V pohledu projektanta hrají důležitou roli amortizační náklady. Ty je možné stanovit metodou tzv. anuit. Metoda předpokládá, že se po dobu ekonomické životnosti zařízení bude investice včetně úroků splácet ročními splátkami A_x (ročními amortizačními náklady N_A):

$$N_A = A_X = N_{IP} \cdot \frac{(1+r_d)^{T_Z}}{(1+r_d)^{T_Z}-1} \cdot r_d \,, \tag{7-15}$$

kde N_A jsou amortizační náklady, A_X roční anuita, T_Z počet roků ekonomické doby životnosti zařízení, r_d je diskontní sazba.

Ze znalosti amortizačních nákladů můžeme stanovit úspory z pohledu projektanta:

$$U_P = U_{CP} - N_A \,, \tag{7-16}$$

kde U_{CP} jsou celkové roční provozní úspory.

7.5.2 Pohled investora

V pohledu investora je zahrnut vztah podniku se státem. To je možné vyjádřit odpisy a daňovými odvody.

V případě odpisů byl použit lineární odpis,který předpokládá znalost ceny investice, zůstatkové ceny zařízení a doby, po kterou investici odepisujeme (stanovená zákonem). Potom můžeme pro lineární odpis psát:

$$O_L = \frac{N_{IP} - C_Z}{T_O} \,, \tag{7-17}$$

kde N_{IP} jsou celkové investiční náklady, C_Z zůstatková cena zařízení a T_O počet let odpisu.

Z pohledu projektanta se roční úspory liší od pohledu investora, který do této položky zahrnuje odpisy a daňové odvody:

$$U_I = U_H - D_O, \tag{7-18}$$

kde U_I jsou úspory z pohledu investora, U_H hrubé úspory a D_O daňové odvody.

Hrubé úspory jsou vyjádřeny jako celkové provozní náklady, snížené o hodnotu odpisu (viz rovnice (7-17)) v daném roce, tedy:

$$U_H = U_{CP} - O_L \tag{7-19}$$

Daňové odvody jsou vyjádřeny jako část nezáporných hrubých úspor, stanovená zákonem:

$$D_O = s_{DP} \cdot U_H \qquad \text{pro} \qquad U_H > 0, \tag{7-20}$$

kde s_{DP} vyjadřuje sazbu daně z příjmu právnických osob. Tato hodnota stanovená v současné době novelizovaným zákonem č. 586/1992, o daních z přímů, má, jak můžeme pozorovat na následující tab. 23 [86], snižující se charakter. Při nižších sazbách daně budou úspory a tedy i výsledné ekonomické ukazatele, popisované v následující kapitole, vycházet ještě o něco příznivěji.

Rok	Sazba daně
2007	24 %
2008	21 %
2009	20 %
2010	19 %

Tab. 23 Snižování daně z příjmů právnických osob [86]

7.6 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 a dynamické [87], [88], [89]. Následující přehled zobrazuje běžné příklady těchto dvou skupin:

- Statické metody (nepřihlíží k působení faktoru času):
  - prostá doba návratnosti
  - průměrný roční tok peněz

- Dynamické metody (přihlíží k působení faktoru času):
  - diskontovaná doba návratnosti
  - čistá současná hodnota
  - vnitřní výnosové procento
  - index ziskovosti

Abychom získali bližší představu o efektivnosti vložené investice, byly jako hlavní kritéria použity dynamické metody popsané v následujících kapitolách.

7.6.1 Doba návratnosti - PP (Payback Period)

Doba návratnosti nám vyjadřuje dobu, za kterou se vložené investice navrátí. Při stanovení doby návratnosti vycházíme z toku peněz (cash flow) určeného v jednotlivých ročních obdobích v průběhu ekonomické doby životnosti zařízení. Podle toho, je-li doba návratnosti pro investora přijatelná, se zamýšlený projekt realizuje, v opačném případě se návrh realizace ve většině případů zamítá.

Stanovení toku peněz (cash flow) je rozdílné v případě projektanta a investora. Tok peněz z pohledu *projektanta* je rozdílem zisků (úspor) z provozu, a ročních investičních nákladů:

$$CF_P = U_{CP} - N_{IR} \tag{7-21}$$

kde U_{CP} jsou celkové roční provozní úspory a N_{IR} investiční náklady v daném roce.

V toku peněz z pohledu *investora* (nepředpokládáme- li úvěr, který je nutno splácet i s úrokem) jsou zahrnuty ještě daňové odvody uzákoněné státem:

$$CF_I = U_{CP} - N_{IR} - D_O \tag{7-22}$$

V obou případech stanovení toků hotovosti není ovšem zahrnuta jejich časová hodnota. Proto se vypočítává tzv. diskontovaný tok hotovosti, který umožňuje vztáhnout toky peněz z budoucnosti na hodnoty současné. To je provedeno pomocí vztahu (7-14) dosazením za příslušné hodnoty:

$$CF_0 = \frac{CF_j}{(1+r_d)^j} \quad , \tag{7-23}$$

kde CF_0 je současná (diskontovaná) hodnota toku peněz, j rok od započetí investice, CF_j je hodnota toku peněz v roce j a r_d je diskontní sazba.

Z hodnot toků peněz však není jasná průběžná hodnota celkového nateklého objemu hotovosti od počátku investice, kterou potřebujeme při stanovení doby návratnosti vložených investic. K tomu nám slouží tzv. kumulovaný (diskontovaný) tok peněz. Určíme ho průběžným sčítáním (kumulováním) diskontovaných toků v jednotlivých ročních obdobích:

$$CF_{K,j} = CF_{K,j-1} + CF_{0,j} \quad , \tag{7-24}$$

kde $CF_{K,j}$ je diskontovaný kumulovaný tok peněz v roce j, $CF_{0,j}$ je diskontovaná hodnota toku peněz v roce j.

Doba návratnosti je potom rok *n*, od započetí investice, ve kterém kumulovaný diskontovaný tok dosáhl kladné hodnoty (došlo k navrácení vložených investičních prostředků).

7.6.2 Čistá současná hodnota - NPV (Net Present Value)

Čistá současná hodnota nám vyjadřuje stav na účtu investice na konci ekonomické doby životnosti zařízení (přepočtený do současnosti). Její hodnota ukazuje, o jakou částku se vložené investiční náklady navýší. V našem případě je tedy čistá současná hodnota rovna kumulovanému diskontovanému toku hotovosti v posledním roce předpokládané doby životnosti zařízení.

7.6.3 Vnitřní výnosové procento - IRR (Internal Rate of Return)

Vnitřní výnosové procento je úroková míra investice, odpovídající nulové hodnotě čisté současné hodnoty (době návratnosti). Hodnotu vnitřního výnosového procenta pak stanovíme jako úrokovou míru *u*, tak aby platilo:

$$\sum_j \frac{CF_j}{(1+\frac{u}{100})^j} = 0 \tag{7-25}$$

7.6.4 Výsledky zhodnocení investice

Pro investiční náklady bez uvažování nákladů na stavební část (sušárna s olejovým okruhem umístněny v prostorách cementárny) a další parametry provozu, popsané v předchozích kapitolách ekonomické analýzy, vycházejí kritéria pro rozhodování o efektivnosti investice způsobem zachyceným v následující tab. 24:

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

Tab. 24 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 CO_2 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 CO_2, dojde k celkovému snížení emisí CO_2 cementárny o cca 8,8 kt CO_2/ rok. S těmito uspořenými emisemi je možné dle Kjótského protokolu [7] obchodovat. Prodejní cena pro dané množství se dle [90] pohybuje okolo 3 €/ t CO_2, roční úspora by tedy činila 26 400 €/ rok, cca 800 tis. Kč/rok, dle jiného zdroje [91] se situace na trhu rychle mění a hodnota se vyhoupla i na 29 €/ t CO_2 a úspory by tedy byly téměř desetinásobné.

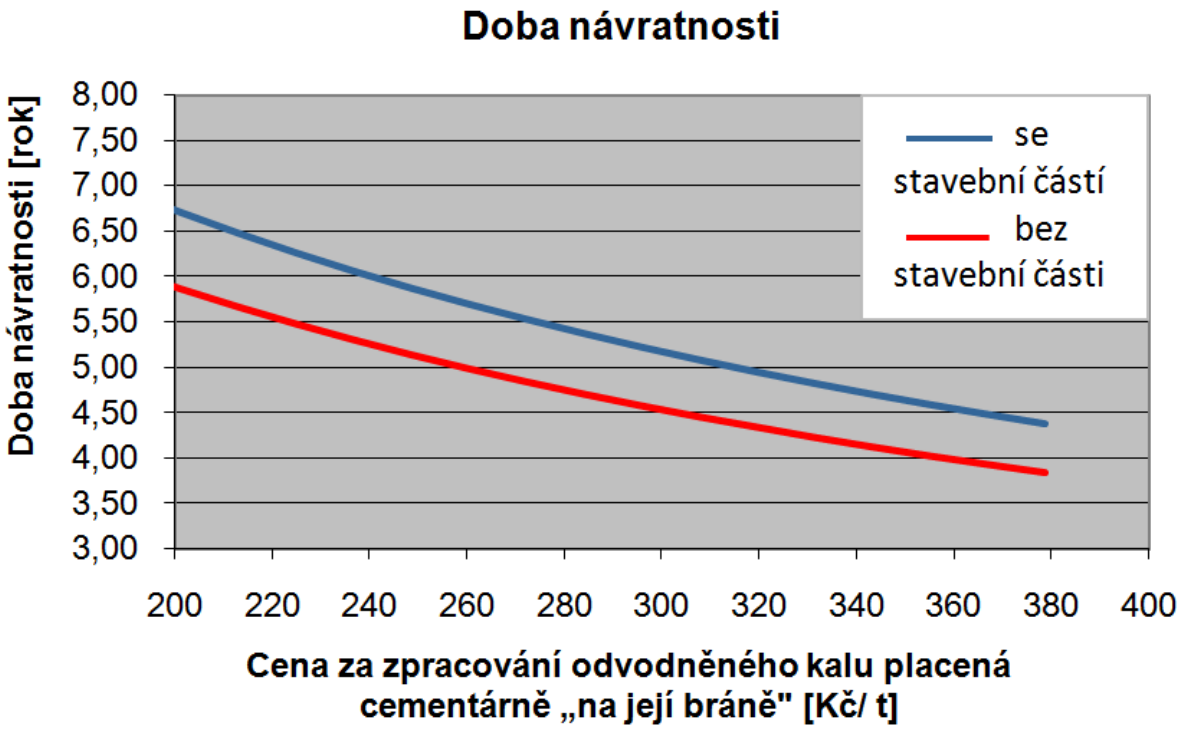
Zahrneme-li nižší potenciální zisk z prodeje emisí, sníží se doba návratnosti o 0,3 roku, tedy na 5,1 roku, vnitřní výnosové procento se zvýší na 16,9 % a čistá současná hodnota se zvýší na 96,3 mil. Kč.

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. 25.

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

Tab. 25 Výsledky kritérií ekonomického hodnocení s uvážením stavebních nákladů

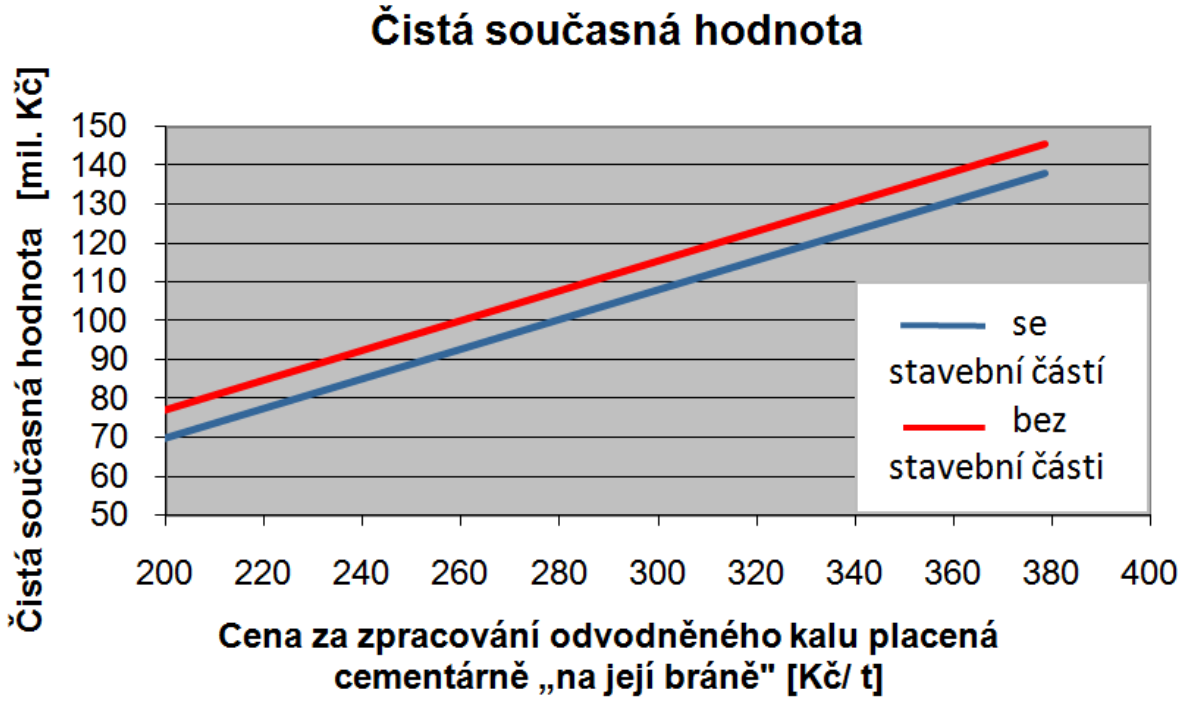
Jak uvádí [92], úlohou ekonomické analýzy není jen vyčíslení hodnot kritérií ekonomické efektivnosti, ale také (nebo zejména) nalezení tzv. minimální ceny produkce, kterou bychom měli považovat za minimální hodnotu, s níž bude pro nás jako pro investora projekt ještě ekonomicky zajímavý. V našem případě 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 7.



Graf 7 Doba návratnosti v závislosti na ceně za zpracování odvodněného kalu „na bráně cementárny“

Hodnoty uvedené v tomto grafu byly vypočteny pro kal s průměrnou sušinou 22 % a uvažováním spálení množství cca 9 kt sušiny/ rok (viz kapitola 7.2.1). Podle tohoto grafu je možné pro zvolenou dobu návratnosti určit minimální cenu za zneškodnění tuny 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 by již tato cena nemusela být zajímavá.

Průběh čisté současné hodnoty (NPV) pro stejné parametry znázorňuje graf 8.



Graf 8 Čistá současná hodnota (NPV) v závislosti na ceně za zpracování odvodněného kalu „na bráně cementárny“

Další grafy ukazatelů ekonomické efektivnosti investice - vnitřního výnosového procenta a použitelného zisku viz příloha 12.

7.6.5 Analýza parametrické citlivosti

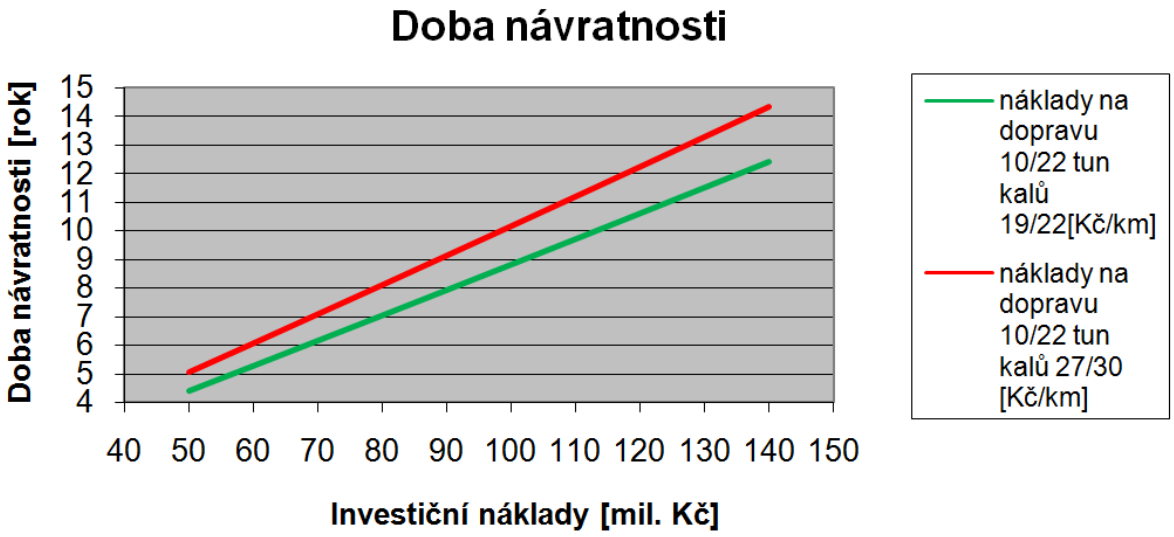
Výše uvedené výsledky ekonomického zhodnocení investice jsou závislé na mnoha parametrech, které je ovlivňují. Za účelem stanovit „rizika“ či rizikové body projektu se provádí citlivostní analýza, která zahrnuje právě zachycení vlivu jednotlivých proměnných parametrů na výsledné ekonomické zhodnocení. Tyto závislosti se vynášejí do grafu, ze kterých je možné každou změnu rychle identifikovat [93]. 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

ad 1) Náklady na dopravu - jak bylo výše zmíněné, pro stanovení nákladů na dopravu byl uvažován transport v nákladních automobilech s nosností 10 a 22 tun (nákladní automobil s vlekem). Aktuální cena za jeden km, závisející na dopravci a velikosti nákladu, se pohybuje v rozmezí 24 až 30 Kč/km. Při rozvaze byla uvažována cena za dopravu 22 t kalů 25 Kč/km, pro dopravu desetitunového nákladu 22 Kč/km, neboť množství dopravovaných kalů je značné, z toho důvodu je možné očekávat i smluvně dohodnuté nižší ceny.

Tato hodnota se však může od skutečné lišit. V případě, že by dopravu zajišťovalo více soukromých dopravců, mohla by tato cena být vyšší. Jakým způsobem by se změnila doba návratnosti při jiných nákladech ukazuje graf 9.



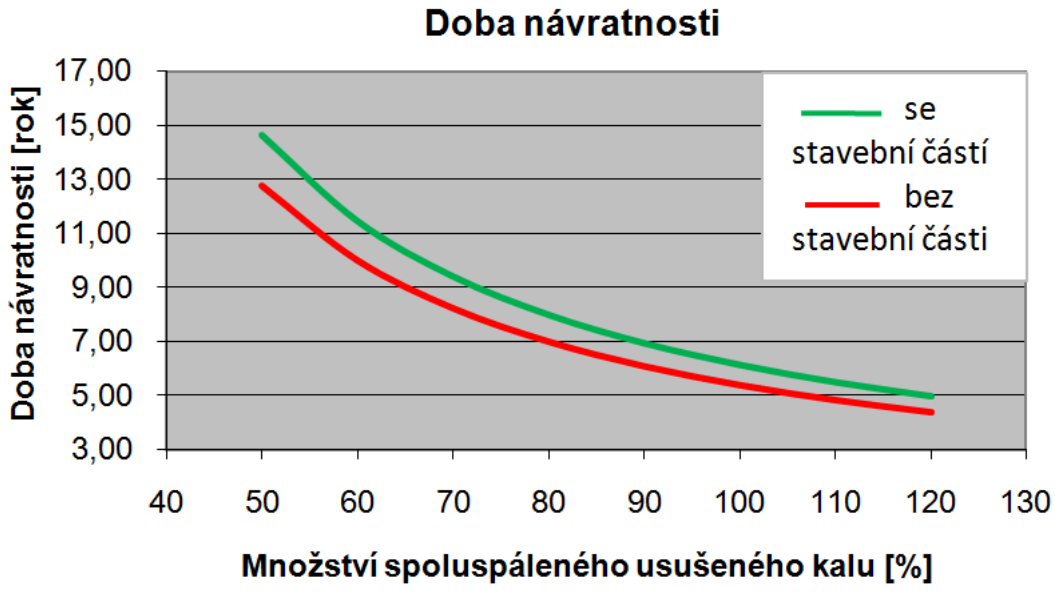
Graf 9 Doba návratnosti v závislosti na nákladech na dopravu

Pro dopravu byl uvažován dopravce z 25 km vzdálených Pardubic, jakožto nejblížší poměrně velké město s potenciální existencí většího dopravce. V ceně za dopravu kalu z jednotlivé ČOV do cementárny byla tedy započítána i cena za přistavení a odstavení autodopravy. Pokud by dopravce byl přímo z Prachovic (uvažování pouze cesty tam a zpět - bez přistavení a odstavení), pak se doba návratnosti pro stanovené podmínky zkrátí o cca 0,8 roku.

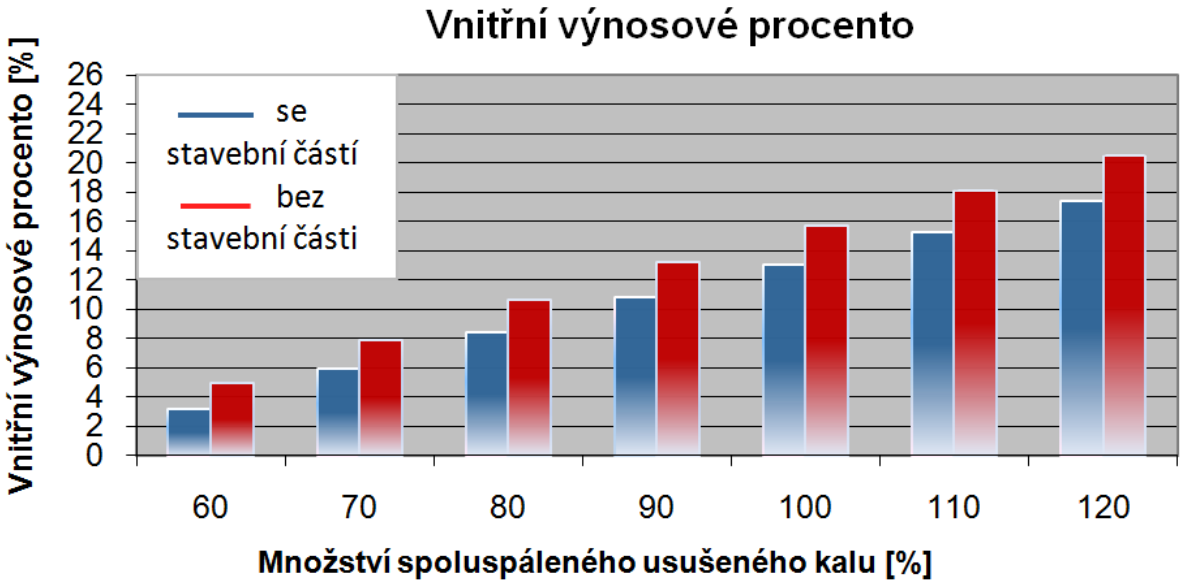
ad 2) Zisk z likvidace kalů - ekonomická analýza uvažovala se sníženými poplatky za zneškodnění kalů, než jaké za ně vydávají ČOV, a to se stejnými po celou dobu přepokládané životnosti zařízení. Zejména pro legislativní úpravy - cena za skládkování stanovená zákonem (č.185/2001 Sb.) má vzrůstající charakter a zpřísňující se legislativa použití kalů v zemědělství, však lze očekávat že náklady na zneškoďnění kalů budou každým rokem vzrůstat a tedy výsledný ekonomický efekt lze očekávat příznivější.

ad 3) Cena elektrické energie - protože nová technologie do sušení kalů obsahuje poměrně velký počet el. zařízení (čerpadla, motor sušárny,...) a s tím spojenou výši výkonu, má z hlediska provozních nákladů, a tedy i celkového ekonomického přínosu nemalý vliv cena elektrické energie. Protože cementárna je velkým odběratelem, byla v bilanci uvažována cena el. energie 1,1 Kč/ MWh. Pokud by cena byla např. dvojnásobná - pak doba návratnosti (bez uvážování stavebních investičních nákladů) se prodlouží o cca 1,1 roku.

ad 4) Množství sušiny - vliv na dobu návratnosti investice má samozřejmě i změna množství zpracovávané sušiny. Snížení množství sušiny může být způsobeno např. nezájmem ze strany ČOV. Zvýšení pak již zmíněnou povinností danou zákonem – do konce roku 2010 snížit množství biodegradabilních odpadů (kaly atd.) ukládaných na skládku na 75 % roku 1995 a dále povinnost vybudovat v obcích s více jak 2000 obyvateli ČOV. Jakým způsobem změna množství, za předpokladu zachované ceny kalu (viz rovnice (7-1)), ovlivní dobu návratnosti a vnitřní výnosové procento ukazují graf 10 a graf 11.



Graf 10 Doba návratnosti v závislosti na množství spoluspáleného kalu



Graf 11 Vnitřní výnosové procento v závislosti na množství spoluspáleného kalu

ad 5) Obsah sušiny – průměrný obsah sušiny kalu z ČOV se pohybuje okolo 22 %. Dnešní odvodňovací zařízení (odstředivky, pásové lisy) jsou však schopny dosáhnout hodnot okolo 30 %. Vyšší obsah sušiny znamená nižší náklady na dopravu, pro cementárnu nižší zisky ze zneškodnění stejného množství sušiny kalu (nižší obsah vody v odvodněném kalu), ale také nižší nutné investiční náklady na sušící linku (stačila by linka s nižším odparem).

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. 26. Mezi ovlivňující parametry byly zahrnuty faktory pod body 1, 3, možnost (resp. nemožnost) prodeje uspořených emisí, a umístnění sušárny v prostorách cementárny.

Parametr	Jednotka	Příznivý vývoj		Nepříznivý vývoj
		Emise 29 €/ t CO_2	Emise 3 €/ t CO_2	
Diskontovaná doba návratnosti (PP)	[rok]	3,1	4,2	8,3
Čistá současná hodnota (NPV)	[mil. Kč]	195,9	126,7	46,1
Vnitřní výnosové procento (IRR)	[%]	31,0	21,3	7,9

Tab. 26 Příznivý a nepříznivý vývoj ekonomického zhodnocení

8 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 cementárenských 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.

Po sběru a zpracování dat z ČOV v okolí konkrétního cementářského provozu, byl po analýze dostupného tepla provozu cementárny navržen doposud nepoužívaný způsob využití nadbytečného tepla spalin pro sušení s následným spalováním kalů.

Byla provedena analýza několika technologií pro sušení kalů, pro vybranou technologii pak navržena realizace vytápění sušárny optimalizovaným „U“ trubkovým svazkovým výměníkem.

Na závěr byla vypracována ekonomická analýza, zahrnující investiční a provozní náklady tohoto projektu, posuzující efektivitu a ekonomickou přijatelnost navrženého řešení.

Z ekonomické analýzy vyplývá, že spalování čistírenských kalů v cementárně při využití nadbytečného tepla z procesu výpalu slinku, 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.

9 LITERATURA

[1] Klass D. L., *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals*, Academic Press, California, 1998

[2] Svoboda A. a kol., *Plynárenská příručka – 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě*, Gas s.r.o., Praha, 1997

[3] Státní energetická koncepce České republiky, schválena vládou ČR dne 10. 3. 2004

[4] Krbek J., Ochrana L., Polesný B., *Průmyslová energetika*, PC-DIR s.r.o., Brno, 1996

[5] *Encyklopedie energie* - Slovník – elektronická podoba, [cit. 2004], dostupný na internetových stránkách: http://www.simopt.cz/energyweb/

[6] Bumba J., *Množství oxidu uhličitého v mořích ohrožuje korály*, [cit. 2004], článek dostupný na internetových stránkách: http://www.bbc.co.uk/czech/worldnews/story/2005/02/050202_climate_oceans_pckg.shtml

[7] *Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu*, OSN 1998, [cit. 2005], dostupný na internetových stránkách: http://www.chmi.cz/cc/kyoto.html

[8] Schröder, *Obnovitelnými zdroji proti terorismu*, EKOLIST, [cit. 2005], článek dostupný na internetových stránkách: http://www.ekolist.cz/clanek.shtml?x=184342

[9] Dohányos M., Zábranská J., *Strategie nakládání s čistírenskými kaly v EU a u nás*, Konference kaly a odpady 2004, Ústav vedecko-technických informací pre pôdohospodárstvo Nitra, 2004

[10] Dohányos M., *Strategie nakládání s čistírenskými kaly*, Odpadové fórum, 2004, roč. 5, č. 5, s. 8 – 11

[11] Pitter P., *Hydrochemie kalů*, SNTL Nakladatelství technické literatury, Praha, 1990

[12] Wherter J., Ogada T., *Sewage Sludge Combustion*, Progress in Energy and Combustion Science, 1999, vol. 25, pp. 55 – 116

[13] Růžek P., Helena K., Hrazdira J., *Využití kalů z čistíren odpadních vod*, Odpady, 1998, roč. 5, č. 3, s. 10 – 11

[14] Hartig K., Krempa P., *Současnost a blízká budoucnost ve spalování kalů z čistíren odpadních vod*, Konference kaly a odpady 2004, Ústav vedecko-technických informací pre pôdohospodárstvo Nitra, 2004

[15] Sponar J., *Možnosti využití odpadů z úpraven a čistíren vod v silikátových technologiích*, Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Brno, 2002

[16] European Commission, DG Environment, *Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge*, Part 2 – Regulatory Report, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2001

[17] Michalová M., *Nakládání s kaly v ČR*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003

[18] Robert A. Corbitt, *Standart Handbook of Environmental Engineering*, McGraw Hill, New York, 1998

[19] Tchobanoglous G., Franklin L. Burton, *Wastewater Engineering*, Treatment, Disposal and Reuse, McGraw Hill, New York, 1991

[20] Nakládání s kaly, Statistické údaje Evropské Unie, [cit. 2003], dostupné na internetových stránkách: http://europa.eu.int

[21] Perry R. H., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 1997

[22] Novotný P., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Soukromé sdělení, Brno, 2005

[23] Dobšáková M., Diplomová práce, Mendlova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 2004

[24] Chytil V., PVS a.s., Soukromé sdělení, únor 2005

[25] Buryan P. a kol., *Pyrolýza předsušeného čistírenského kalu ve vertikálním reaktoru*, Komunální odpady a kaly z čistíren odpadních vod, sborník z konference IREAS, Institut pro strukturální politiku, o. p. s., Praha, 2005

[26] Michalová M., *Kaly - velký problém malých čistíren*, časopis Moderní obec, [cit. květen 2005], dostupné též na internetových stránkách: http://moderniobec.ihned.cz/c1-16084730-kaly-velky-problem-malych-cistiren

[27] Kolektiv autorů, *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice*, ČEZ a.s., Praha, 2003

[28] Walter R. Niessen, *Combustion and Incineration Processes*, Marcel Dekker, New York, 1995

[29] Dirkzwager A. H., Hermite P.: *Sewage Sludge Treatment and Use – New Developments, Technological Aspects and Environmental effects*, Elsevier Applied Science, Great Britain, 1989

[30] Šikula J., EVECO Brno s.r.o., Soukromé sdělení, 2003

[31] Gemrich J., Schlattauer P., Táborský T., *Spalování čistírenských kalů v cementárně*, Odpadové fórum, 2001, roč. 4, č. 1, s. 12 – 13

[32] Hartig K., *Fluidní spalování kalů*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003

[33] Prospekty německé firmy Putzmeister, [cit. 2005], dostupné na internetových stránkách: http://www.putzmeister.de/pm_online/data/IP_3049_D.pdf a http://www.putzmeister-solid-pumps.com/pit/data/IP_3089_D_KSMV.pdf

[34] Neubrand K., *Spalování čistírenských kalů v tepelných elektrárnách, používající jako palivo hnědé uhlí*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003

[35] Hartig K., *Současná a blízká budoucnost v spalování kalů z čistíren odpadních vod*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003

[36] Divecká H., Valentová Z., *Ovlivnění provozních nákladů spoluspalování kalů jeho dopravou do teplárny/ elektrárny*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003

[37] Kutil J., Prospěch L., *Spoluspalování čistírenských kalů v elektrárně a cementárně, Konference kaly a odpady 2004*, Ústav vedecko-technických informací pre pôdohospodárstvo Nitra, 2004

[38] European Commission, DG Environment, *Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge, Part 3 – Scientific and technical Report*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2001

[39] Fa Integral., *Preparation of Sewage Sludge and Combustion Plants for energetic purpose (FWW-Wien)*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003

[40] Chudoba P., Rosenbergová R., *Praktické zkušenosti se zpracováním kalů ve fluidní spalovně Pyrofluid*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, CICERO Ostrava, 2003

[41] Šikula J., Oral J., Puchýř R., Hajný Z., Bébar L., Trunda P., Stehlík P., Výzkumná zpráva - *Komplexní řešení průmyslového případu termického zpracování odpadu (kalu) – rekonstrukce, využívání energie, realizace*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, prosinec 2001

[42] Stehlík P., Odborný posudek ke zpracované koncepci ÚČOV z hlediska technologického řešení, včetně posouzení zpracování surových kalů z ÚČOV Praha v různých lokalitách a posouzení kalové koncovky, Brno, červenec 2004

[43] Kůra O., Schneiderová J., Vávra J., *Připravovaná termická likvidace čistírenských kalů z ČOV Brno*, Sovak, 2000, č. 11, s. 16 – 17

[44] Veverka Z., *Alternativní paliva v cementárnách*, Odpadové fórum, 2004, roč. 5, č. 10, s. 8 – 11

[45] Svaz švýcarských cementáren, Kennzahlen 2007, [cit. 2008], dostupné na internetových stránkách: http://www.cemsuisse.ch/index.html?&page_id=51&node=13&level=2&l=2

[46] Gemrich J., Lahovský J., Táborský T, *Ochrana životního prostředí a využití vápenců*, Ministerstvo životního prostředí ve spolupráci s Výzkumným ústavem maltovin Praha, ARTIS, 1998

[47] VUMO, SV-CEVA, *Cementárny a životní prostředí*, osvětový materiál, Sdružení výrobců cementu a vápna Čech, Moravy a Slezska, Výzkumný ústav maltovin Praha, ARTIS, [cit. 2005], dostupný na internetových stránkách: http://www.vumo.cz/

[48] Budget Quotation No.654, *Full Drying Systém TST 2264*, cenová nabídka a technická specifikace systému sušení firmy Atlas Stord, Krefeld, 2004

[49] Bébar L., Martinak P., *Měření linky výpalu slínku v cementárně Holcim, a.s. Prachovice*, interní zpráva firmy EVECO Brno, Brno, 2001

[50] Jegla Z., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Soukromé sdělení, Brno, únor 2008

[51] Barriquand, *Platular exchangers*, nabídka výrobků firmy Barriquand echangeurs, [cit. 2009], dostupná na internetových stránkách: http://www.barriquand.com/en/gammes/platulaires.htm

[52] Oral J., EVECO Brno s.r.o., Soukromé sdělení, Brno 2004

[53] Jegla Z., *Integrace pecí do procesů za účelem redukce spotřeby energie*, Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno 1999

[54] VereinDeutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, *VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1984

[55] Hewitt G. F., (coordinating editor), *Process heat transfer*, CRC Press, 1994

[56] G.F. Hewitt (executive editor), *HEDH - Heat Exchanger Design Handbook*, Beggel House Inc., New York, 1998

[57] Weingartner J., Chempex HTE a.s., Soukromé sdělení, Brno, únor 2008

[58] Šourek B., ČVUT Praha, *Tepelné sítě* - přednáška předmětu Zásobování teplem a teplárenství I. a II, [cit. 2005], dostupná na internetových stránkách: http://www.fsid.cvut.cz/~sourek/homepage/vyuka/ZTE/Prednasky/Prednaska4.pdf

[59] Rédr M., Příhoda M., *Základy tepelné techniky*, SNTL, Praha 1991

[60] *Podklady ze cvičení předmětu Tepelné pochody*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Brno, 2001

[61] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, Subcommittee on Materials, *2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II Part D – Properties (Metric),* The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2007

[62] Slavík J., *Význam kogenerace při snižování energetické náročnosti v procesním průmyslu*, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 1998

[63] Úřad pro normalizaci a měření, *Výpočet teploty stěny trubek výhřevných ploch kotlů,* Oborová norma ON 07 0415, Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, Praha, 1976

[64] *Therminol 66 - Heat Transfer Fluid by Solutia*, Technical Bulletin 7239146D (Supersedes 9146C), Solutia Inc., Litho in U.S.A., 2004, [cit. 2008],dostupné též na internetových stránkách: www.therminol.com.

[65] Bafrncová S., Šefčíková M., Vajda M., *Chemické inžinierstvo Tabul`ky a grafy*, Vydavatel`stvo STU v Bratislave, 2000

[66] Chemické inžinierstvo - Priklady a úlohy, *Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1996*

[67] *Podklady ze cvičení předmětu Aplikovaná fyzikální chemie*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Brno, 2001

[68] Stehlík P., *Termofyzikální vlastnosti,* skripta, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 1992

[69] Vlachynský K. a kol., *Co by měl podnikatel vědět o financích*, Edice Firma & Trh, Bratislava, 1993

[70] Schnell H., *Technisch-wirtschaftliche Optimierung von Wärmeaustauschern*. In Handbuch Wärmeübertragung. Vulkan-Verlag, Essen, 1991

[71] Perry R. H., Green D. V., Maloney J. O., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th edition, McGraw-Hill, New York, 1984

[72] Ahmad S., Linhoff B., Smith R., *Cost Optimum Heat Exchangers Network – 2. Targets and Design for Detailed Capital Cost Models*, Computers and Chem. Engng., Vol. 14, No. 7, pp. 751-767, 1990

[73] Jegede F.O. and Poley G. T., *Optimum Heat Exchanger Design*, Trans IChemE, Vol. 70, Part A, pp. 133 – 141, March 1992

[74] Reppich M., *Optimale Auslegung von Rohrbündelwärmeübertragern mit Umlenksegmenten*, Kandidátská disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno 1993

[75] Klima a.s. Prachatice, *Vzduchotechnika*, Firemní prezentace ve formátu pps, 2007

[76] Krentel D., Bertrams Heatec AG - Thermal Process Technology, quotation - obchodní nabídka, Basel, 2008

[77] Krákora F., Euroenergie.cz, Soukromé sdělení, březen 2008

[78] Stehlík P.[1], Oral J.[2], *Klíčová role přenosu tepla v systémech energetického využití odpadů - Heat Transfer as Important Subject in Waste-to-energy Systems*, článek, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství[1], EVECO Brno[2], Brno

[79] Martinák P., Lenfeld P., Hajný Z., Stehlík P. (autor i řešitel), Kohoutek J., Vyškovský K., Oral J., Březina J., Dalibor K., *Snižování energetické náročnosti procesů - Případová studie rekonstrukce (Sběr dat, energetické a ekonomické aspekty)*, výzkumná zpráva VZ-362-363/08 pro řešení projektu OK 362 a OK 363, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Brno 1999

[80] Elektronická mapa ČR a Evropy, [cit. 2005], dostupné též na internetových stránkách www.mapy.cz

[81] Kubant M., Holcim (Česko) a.s., Soukromé sdělení, 2004

[82] Kostelný M., *Význam kogenerace při snižování energetické náročnosti v procesním průmyslu*, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 1998

[83] Martinák P., *Efektivní využití energetických zdrojů v procesním průmyslu*, Dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2002

[84] *Diskontní sazba*, Slovník pojmů internetového portálu Businesscenter.cz, [cit. 2008], dostupný na internetových stránkách: http://business.center.cz/business/pojmy/p946-diskontni-sazba.aspx

[85] *Vývoj diskontní sazby ČNB*, Internetový portál české národní banky (ČNB), [cit. 2008], dostupný na internetových stránkách: http://www.cnb.cz/cs/faq/faq_diskontni_historie.html

[86] *Daň z příjmu právnických osob,* Článek na internetovém portálu Podnikatel, [cit. 2008], dostupný na internetových stránkách: http://www.podnikatel.cz/firma/dane/special-reforma-pd-pravnicke-osoby/

[87] Kordíková Z., *Metody hodnocení investičních variant,* [cit. 2008], Článek dostupný na internetových stránkách: st.vse.cz/~XHORV11/PE301/investice.doc

[88] Hašek J., *Metody hodnocení investic,* [cit. 2008], Článek dostupný na internetových stránkách: http://www.icm.uh.cz/soubor.py/FIL5092

[89] *Investiční činnost, maturitní otázka,* [cit. 2008], Článek dostupný na internetových stránkách: http://www.seminarky.cz/Investicni-cinnost-maturitni-otazka--14229

[90] Firma Eurobatery, Soukromé sdělení, únor 2005

[91] Holas V., Holcim (Česko) a.s., Soukromé sdělení, Brno 2007

[92] Knápek J., Vašíček J., *Hodnocení ekonomické efektivnosti projektů využívajících obnovitelné zdroje energie*. In Obnovitelné zdroje energie pro venkov i teplárenství, Parexpo, s. 85-93. ISBN 80-239-2824-4, Pardubice, 2004

[93] 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

10 PUBLIKACE AUTORA

[1] Šťasta P., Oral J., Martinák P., Stehlík P., Šikula J., *Průmyslové využití alternativního plynného paliva I. – Náhrada zemního plynu důlním, rozvody, ekonomické zhodnocení*, výzkumná zpráva VZ-EU-UPEI-2002/02 pro řešení výzkumného záměru VZ 300004, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, listopad 2002

[2] Martinák P., Bébar L., Strýček M., Oral J., Šťasta P., Stehlík P., *Využití tříděného komunálního odpadu jako alternativního paliva při výrobě stavebních hmot*, výzkumná zpráva VZ-EU-UPEI-2002/05, VUT Brno, listopad 2002

[3] Kermes V., Šťasta P., Schwec P., Martinák P., Oral J., Stehlík P.: *Průmyslové využití alternativního plynného paliva II. - Spalování důlního plynu*, výzkumná zpráva VZ-EU-UPEI-2002/03, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, listopad 2002

[4] Kermes V., Stasta P., Sikula J., Oral J., Martinak P., Stehlik P.: *Substituting Fuel by Mining Gas in Unit for Thermal Treatment of Sludge*, IT3´03 Conference, Orlando, Florida, May 12-16, 2003

[5] Kermes V., Hajek J., Oral J., Stehlik P., Bebar L. and Stasta P., *Optimised Burner Design for NOx Emission Reduction*, ACHEMA 2003, 27th International Exhibition - Congress on Chemical Engineering, Enviromental Protection and Biotechnology, Frankfurt am Main, Germany, 19 - 24 May, 2003 Germany

[6] Bébar L., Kermes V., Puchýř R., Šťasta P., Stehlík P., Oral J.: *Waste as Alternative Fuel for Cement and Lime Production Industry*, 4th International Symposium on waste Treatment Technologies, Sheffield UK, 29 June – 2 July 2003

[7] Šťasta P., Boráň J., Bébar L., Oral J., Sponar J., Stehlík P., *Alternativní možnosti zpracování čistírenských kalů*, konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, Brno, Česká republika, 2003

[8] Šťasta P., Boráň J., Bébar L., Oral J., Kermes V., Stehlík P.: *Termické zpracování kalů z čistíren odpadních vod*, 50. konference CHISA, Srní, říjen 2003

[9] Šťasta P., Boráň J., Bébar L., Stehlík P., Oral J., Ucekaj V., *Průmyslové využití alternativních paliv – termické zpracování čistírenských kalů*, Výzkumná zpráva VZ-EU-UPEI-2003/02, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, listopad 2003

[10] Šťasta P., Boráň J., Bébar L., Oral J., Sponar J., Stehlík P., *Alternativní možnosti zpracování čistírenských kalů*, SOVAK, 2004, roč. 13, č. 3, s. 19 - 22

[11] Stasta P., Boran J., Bebar L., Stehlik P. and Oral J., *Industrial Utilization of Alternative Fuel – Thermal Processing of Sewage Sludge*, Applied Thermal Engineering, 16th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002, 6th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2004, Proceedings on CD ROM, Prague, Czech Republic (August 22–26, 2004)

[12] Šťasta P., Ucekaj V., Boráň J., Stehlík P., Oral J., *Termické zpracování kalů z ČOV v cementárenských pecích*, výzkumná zpráva VZ-EU-UPEI-2004/03, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, listopad 2004

[13] Boráň J., Houdková L., Ucekaj V., Šťasta P., Stehlík P., *Analýza technologických linek pro energetické využití kalů*, výzkumná zpráva VZ-EU-UPEI-2004/02, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, listopad 2004

[14] Stasta P., Boran J., Bebar L., Stehlik P. and Oral J., *Industrial Utilization of Alternative Fuel – Thermal Processing of Sewage Sludge*, Applied Thermal Engineering, 2006

PŘÍLOHY

Seznam příloh:

Příloha 1 - Parametry čistíren odpadních vod z 50km okolí cementárny

Příloha 2 - Schema navrženého způsobu zpracování kalu v cementárně

Příloha 3 - Parametry obou větví spalin před stabilizátory

Příloha 4 - Popis technologií sušení kalu a obchodních podmínek

Příloha 5 - Odvození součinitele tlakové ztráty ξ pro proudění spalin přes svazek trubek [54]

Příloha 6 - Strojně technologické schéma olejového okruhu

Příloha 7 - Tabulka vlastností teplonosného oleje Terminol 66

Příloha 8 - Měření a regulace (MaR) olejového okruhu a sušárny

Příloha 9 - Přehled a ocenění armatur olejového okruhu

Příloha 10 - Stanovení investičních nákladů projektu

Příloha 11 - Kombinovaný hořák Unitherm rotační pece cementárny pro spalování kapalných, tuhých i plynných paliv [81]

Příloha 12 - Další ukazatele ekonomického hodnocení investice

Příloha 1 - Parametry čistíren odpadních vod z 50km okolí cementárny

Viz samostatně přiložený soubor ve formátu pdf.

Příloha 2 - Schema navrženého způsobu zpracování kalu v cementárně

Viz výkres přiložený jako samostatný soubor ve formátu pdf.

Příloha 3 - Parametry obou větví spalin před stabilizátory

Parametry spalin před stabilizátory - větev „a“

Režim 1 - Provoz pouze rotační pece

číslo měření		1	2	3
Teplota T	℃	384	387	359
entalpie i	kJ/m_N^3	532,8	537,2	496,7
Průtok spalin	m_N^3/hod	110973	111728	103416
Tepený tok	MW	16,42	16,67	14,27

Režim 2 - Provoz rotační pece s uhelnou mlýnicí

číslo měření		1	2	3
Teplota T	℃	372	374	372
entalpie i	kJ/m_N^3	515,5	518,3	515,5
Průtok spalin	m_N^3/hod	111045	110751	112133
Tepený tok	MW	15,90	15,95	16,06

Režim 3 - Provoz rotační pece s uhelnou mlýnicí a surovinovou mlýnicí

číslo měření		1	2	3
Teplota T	℃	385	380	382
entalpie i	kJ/m_N^3	534,3	527,0	529,9
Průtok spalin	m_N^3/hod	92933	94097	93568
Tepený tok	MW	13,79	13,78	13,77

Režim 4 - Provoz rotační pece se surovinovou mlýnicí

číslo měření		1	2	3
Teplota T	℃	366	363	365
entalpie i	kJ/m_N^3	506,8	502,4	505,3
Průtok spalin	m_N^3/hod	86453,5	86464,9	86824,3
Tepený tok	MW	12,17	12,07	12,19

Min. a max. teplota v měřícím místě	℃	MIN	359,00
		MAX	387,00
Min. a max. průtok v měřícím místě	Nm3/h	MIN	86453,50
		MAX	112133,00
Min. a max. tepelný tok v měřícím místě		MIN	12,07
		MAX	16,67

Pozn.: Provoz pouze rotační pece = teplo spalin není využité pro předehřev suroviny či uhlí v surovinové, resp. uhelné mlýníci.

Parametry spalin před stabilizátory - větev „b“

Režim 1 - Provoz pouze rotační pece

číslo měření		1	2	3
Teplota T	℃	390	393	367
entalpie i	kJ/m_N^3	541,5	545,9	508,2
Průtok spalin	m_N^3/hod	113611	112944	118212
Tepený tok	MW	17,09	17,13	16,69

Režim 2 - Provoz rotační pece s uhelnou mlýnicí

číslo měření		1	2	3
Teplota T	℃	368	370	378
entalpie i	kJ/m_N^3	509,7	512,6	524,1
Průtok spalin	m_N^3/hod	115635	115325	113649
Tepený tok	MW	16,37	16,42	16,55

Režim 3 - Provoz rotační pece s uhelnou mlýnicí a surovinovou mlýnicí

číslo měření		1	2	3
Teplota T	℃	375	370	373
entalpie i	kJ/m_N^3	519,8	512,6	516,9
Průtok spalin	m_N^3/hod	89287,8	89294,3	89529,5
Tepený tok	MW	12,89	12,71	12,85

Režim 4 - Provoz rotační pece se surovinovou mlýnicí

číslo měření		1	2	3
Teplota T	℃	371	369	380
entalpie i	kJ/m_N^3	514,0	511,1	527,0
Průtok spalin	m_N^3/hod	97469,8	97193,8	97690,8
Tepený tok	MW	13,92	13,80	14,30

Min. a max. teplota v měřícím místě	℃	MIN	367,00
		MAX	393,00
Min. a max. průtok v měřícím místě	Nm3/h	MIN	89287,80
		MAX	118212,00
Min. a max. tepelný tok v měřícím místě		MIN	12,71
		MAX	17,13

Pozn.: Provoz pouze rotační pece = teplo spalin není využité pro předehřev suroviny či uhlí v surovinové, resp. uhelné mlýníci.

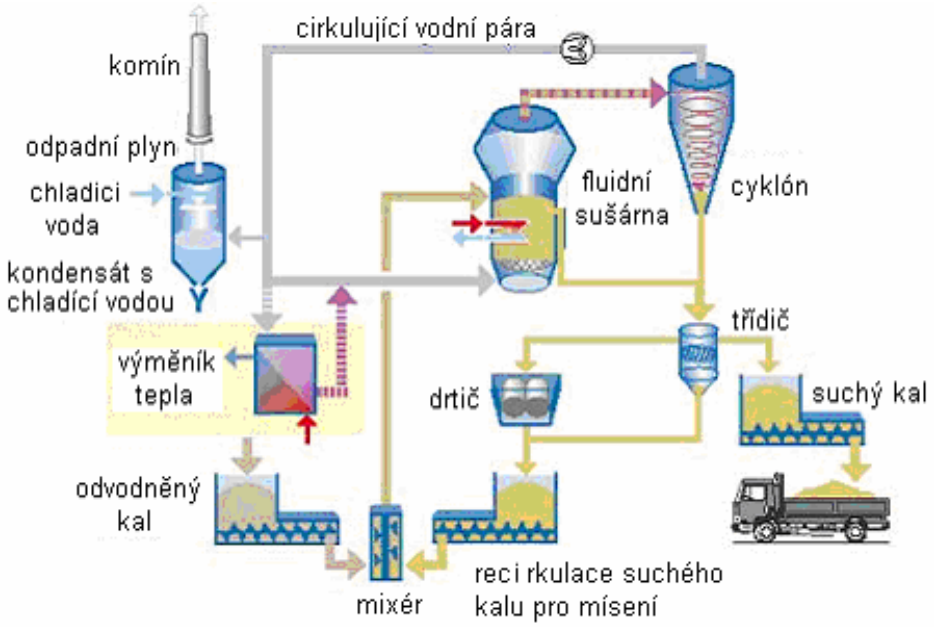
Příloha 4 - Popis technologií sušení kalu a obchodních podmínek

1. Fluidní technologie sušení kalů

Dodavatelem fluidní technologie, kterou můžeme pozorovat na obr. 31 je rakouská firma Andritz (Graz).

Tato fluidní technologie označovaná zkratkou CDS pracuje při nízkých teplotách (max 105°C) a s „uzavřeným“ okruhem vodních par tzv. close loop system.

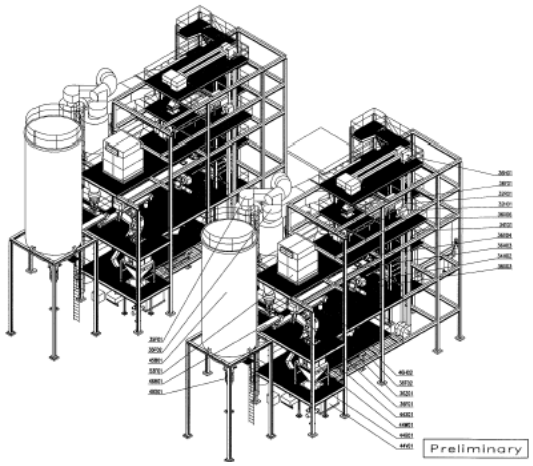
Odvodněný kal je ze zásobníku dopravován šnekovým čerpadlem do mixéru, kde je míchán s již vysušeným produktem, a to z důvodu zamezení vzniku nálepů. Klihovitá fáze kalu vzniká při obsahu sušiny v kalu mezi 50 až 60 hm. %, a proto je nutné obsah sušiny v kalu zvýšit nad tuto hranici na cca 65 %. Odtud je kal dopraven do fluidní sušárny, kde je kal vysušen přibližně na obsah sušiny 92 %. Sušárna je vyhřívaná nepřímo např. horkým olejem a přímo parami ohřátými ve výměníku (páry cirkulují v uzavřeném okruhu). Díky tzv. close loop (uzavřenému) systému je při sušení obsažen kyslík jen malým procentem (cca 1 %), čímž je snížena možnost výbuchu vysušeného materiálu. V cyklónu umístněném za sušárnou probíhá oddělení prachu z usušeného kalu a par. Usušený kal je dále na sítu roztříděn, část je s případným drcením vracena (pro překlenutí klihovité fáze), zbytek odchází do skladovacího sila.



Obr. 31 Fluidní technologie Andritz pro sušení čistírenských kalů

Základní technické údaje pro uvažované množství kalů:

Počet linek: 1
Množství vlhkého kalu: 6000 kg/h Obsah sušiny vlhkého kalu: 16 až 30 %
Množství usušeného kalu: 1370 kg/h Obsah sušiny usušeného kalu: 92 %
Velikost výstupních částic: 0,5 až 4 mm Hustota: 500 až 700 kg/m3
Odpar vody: 4630 kg/h Množství termo-oleje: cca 360 m^3/h
Spotřeba el. energie: cca 180 kW
Spotřeba N_2 pro inertizaci při spouštění / odstavování: cca 600 l
Rozměry: délka: 16,5 m šířka: 11,47 m výška: 17,2 m



Obr. 32 Pohled na dispozici technologie pro fluidní sušení čistírenských kalů

Obchodní údaje:

Rozsah dodávky: mixér, vstupní šnekový dopravník, fluidní sušárna, 3x šnekový dopravník (horní, dolní, granulát), 3x rotační dávkovací uzávěr (horní, dolní, pro recyklaci), dopravní žlab, drtič, řetězový dopravník, váhy, 2x cyklón, 2x ventilátor, 4x rotační uzávěr, filtr na sání (odsávání), chladič granulátu (protiproudý, šnekový), nosné konstrukce, plošiny, potrubí, ventily, izolace bubnu, filtru a potrubí (pouze na potřebných místech), elektrické zařízení a příslušenství (motory, instalace, kabely, PLC, měřící přístroje, dokumentace), dohled při instalaci, spouštění do provozu, provozní zkoušky, školení údržby a provozu

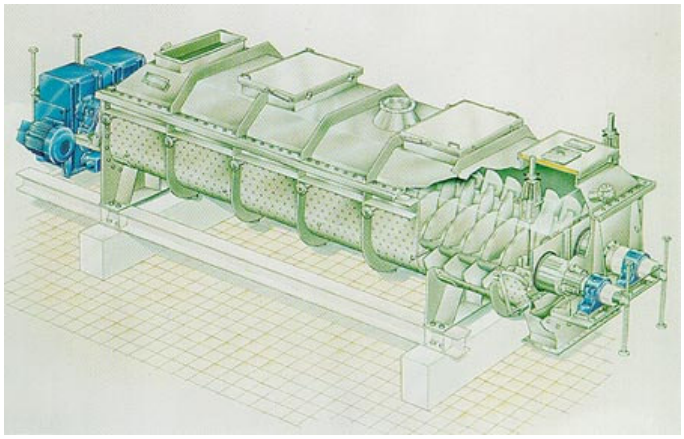
Doplňkové příslušenství: třídič, vyrovnávací zásobník, pneumatický dopravník pro hustou fázi, filtr sání pro silo, prachový ventilátor, žlab pro vykládání produktu, dávkovací a transportní šnekový podavač, kondenzátor, výměník, čerpadlo

Dodávka nezahrnuje: stavební práce, osvětlení, strojní a elektrická instalace, potrubí mimo hranice, záložní zdroj el. energie, doprava kalu do sila, skladování produktu, zařízení pro využití tepla, sběrač kondenzátu, jeřáby a zdvihací zařízení pro složení a instalaci veškerých zařízení, poplatky spojené s vyřízením potřebných povolení, s měřením (emisí, …) nebo odběrem vzorků pro analýzy

Celková cena dodávky (bez DPH): 3 490 000 Euro

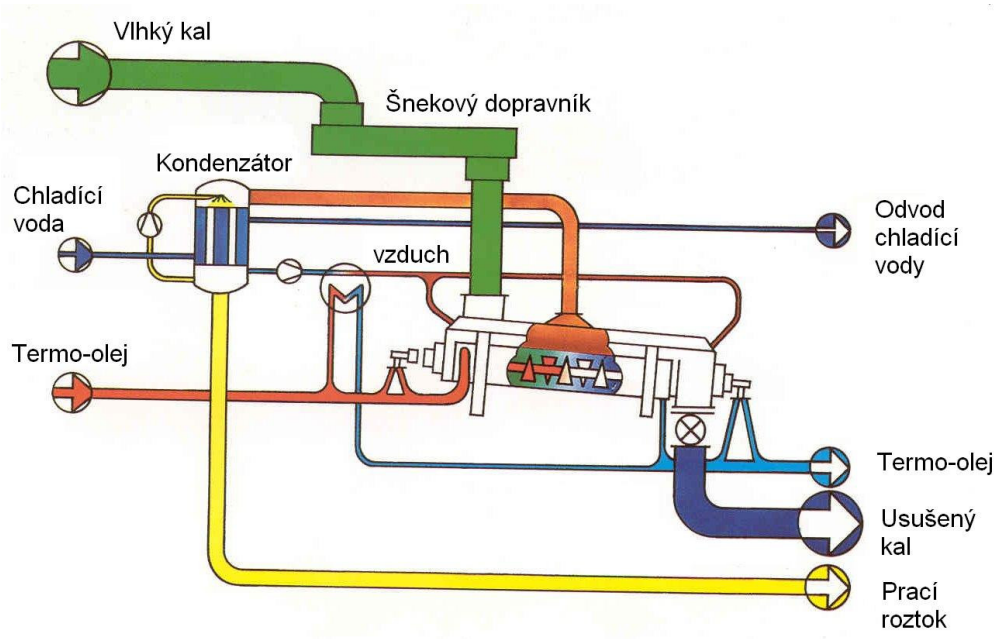
2. Technologie sušení kalů v lopatkové sušárně

Od holandské firmy GMF-Gouda byla získána nabídka technologie nepřímo (olejem) vyhřívané lopatková sušárny – Nara – paddle dryer (viz obr. 33). Stejné zařízení je v současné době instalováno na brněnské čistírně odpadních vod. Vysušené kaly se odtud budou odvážet a spalovat v nedaleké cementárně Mokrá.



Obr. 33 Nepřímo vyhřívaná dvouhřídelová lopatková sušárna

Popis technologie: Sušárna je určena pro práškové, granulované a pastovité materiály. Vlhký kal je do sušárny dávkován šnekovým dopravníkem.



Obr. 34 Technologické schéma sušení kalů v lopatkové sušárně Nara

V sušárně je kal přesouván a promícháván pomocí protichůdně se otáčejících, olejem vyhřívanými lopatkami šípovitého tvaru. Dalším médiem pro vytápění je malé množství vzduchu předehřívaného ve výměníku olej/vzduch. Brýdové páry mohou být dále vedeny buď do hadicového filtru pro odloučení prachu, nebo do sprchového kondenzátoru s vypíracím roztokem. Tímto je též zamezeno možnosti vzniku nepříjemného zápachu.

Základní technické údaje:

Počet linek: 1
Množství vlhkého kalu: 5800 kg/h
Množství usušeného kalu: 1300 kg/h
Odpar vody: 4500 kg/h
Teplota oleje: 250/225 °C
Výstupní teplota kalu: 100°C
Obsah sušiny vlhkého kalu: 21 %
Obsah sušiny usušeného kalu: >95 %
Množství termo-oleje: 200 000 kg/h
Tlak oleje: <700 kPa

Podle zkušebních testů bude rozhodnuto pro použití sušárny Nara typ 17 W 240 nebo sušárny s větší kapacitou Nara 17 W 300.

		17 W 240	17 W 300
Teplo-směnná plocha:		238 m^2	295 m^2
Výkon motoru:		200 kW	250 kW
Rozměry:	Délka:	14 500 mm	16 400 mm
	Šířka:	3980 mm	3980 mm
	Výška:	4030 mm	4030 mm
Hmotnost:		90 000 kg	100 000 kg

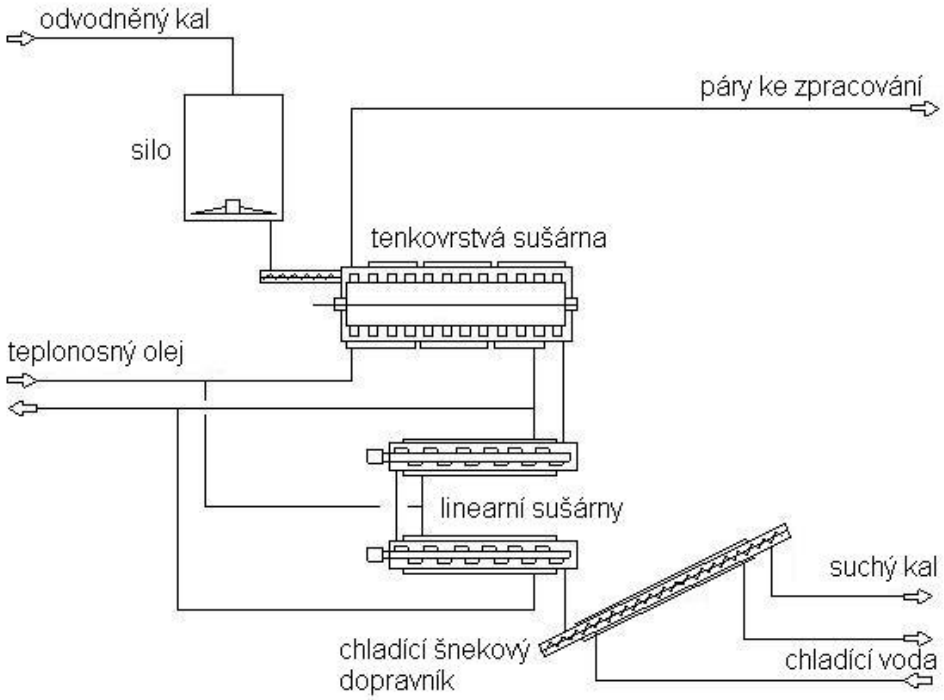
Obchodní údaje:

Rozsah dodávky: kompletní lopatková sušárna s přepadem, s prachotěsným víkem s inspekčními otvory, motory, olejem mazanými ložisky s olejovým zásobníkem.

	17 W 240	17 W 300
Cena dodávky:	1 890 000 Euro	2 173 000 Euro

3. Technologie sušení kalů v tenkovrstvé a lineární sušárně

Německá firma Limus z Berlína nabídla pro sušení kalů technologii s dvěma sériově zapojenými sušárnami- tenkovrstvou (thin-film) a lineární sušárnou jsou zobrazeny na obr. *35*. Zajímavostí je, že tato firma na svých internetových stránkách nabízí i technologii s diskovou olejem vyhřívanou diskovou sušárnou (popsanou výše), kterou dodává firma Atlas-Stord (viz obr. 35), nabídnuta však pro naše účely byla technologie s tenkovrstvou a lineární sušárnou. Výhodou této technologie je, že není nutné, jak je tomu u diskové sušárny, míchat odvodněný kal s kalem již vysušeným.



Obr. 35 Technologie sušení kalů „Niederkrüchten" s tenkovrstvou a lineární sušárnou

Popis technologie: Odvodněný kal je šnekovým dopravníkem dopraven do tenko-vrstvé sušárny. Zde je kal vysušen na obsah sušiny okolo 65 % (za úroveň lepivé fáze) a zároveň granulován. Za tenko-vrstvou sušárnou následuje lineární sušárna (v případě potřeby jsou dvě a více), která dosuší kal až na obsah sušiny cca 90 %. Z tenko-vrstvé sušárny vstupuje vysušený kal o teplotě cca 100 °C do šnekového dopravníku, jehož plášť je vodou chlazený, kde se jeho teplota sníží na cca 40 °C. Při této teplotě je již kal možno bezpečně skladovat. Pro dochlazení kalu ve šnekovém chladiči je použit vzduch přivedený v proti-proudném směru. Odtud je vzduch dále veden přes lineární a tenko-vrstvou sušárnu, kde přispívá k procesu sušení a zároveň udržuje teplotu kalu poměrně nízkou. Po ochlazení je kal dopraven pomocí korečkového dopravníku do skladovacího sila. Brýdové páry (cca 10 – 30 % tvoří zmíněný vzduch určený pro lepší chlazení a sušení kalu) jsou odsávány ventilátorem

a kondenzují v kondenzátorech. Jednoduchost sušících zařízení umožňuje provoz bez obsluhy. V materiálech této firmy je uvedeno, že i odstavování celé linky je možné provést stiskem jednoho tlačítka.

Základní technické údaje:

Počet linek: 1
Množství vlhkého kalu: 5800 kg/h
Výstup. množství sušiny kalu: 1354 kg/h
Odpar vody: 4446 kg/h
Výstupní teplota kalu: 40°C
Spotřeba elektrické energie: cca 365 kW
Obsah sušiny vlhkého kalu: 21 %
Obsah sušiny usušeného kalu: 90 %
Teplota oleje: 200/175 °C T
Spotřeba tepla: 3300 kW

Obchodní údaje:

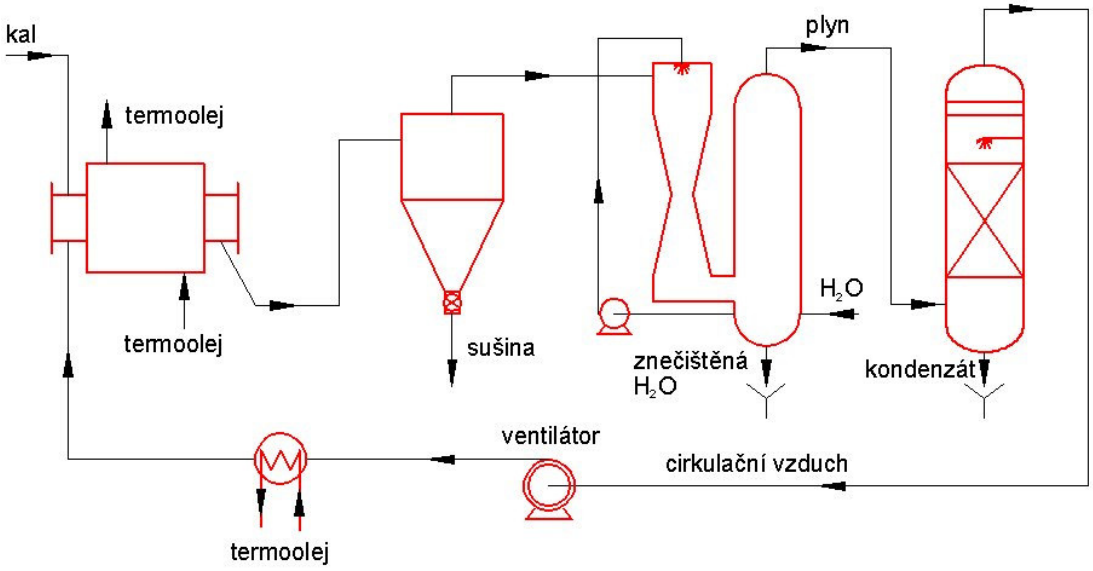
Rozsah dodávky: tenko-vrstvá sušárna (hmotnost 120t), (výrobce fa Buss-Sms u které byla též poptána technologie sušení kalů), 1x šnekový dopravník, lineární sušárna (hmotnost 12,5t), chladící šnekový dopravník, 2x kondenzátor, dohled při instalaci (9 dní) a konzultace (30 dní), (každý den práce navíc 650 euro), příprava smluv pro potřebná potvrzení.

Dodávka nezahrnuje: silo s ventilátory (40m^3, 5,5kW), šnekový dopravník (kalu do sušárny), 2x kompresor (2,2 kW, 10 bar, 200 l/min), potrubí, ventily, korečkový dopravník, 4x čerpadlo (1x 100 m^3/h, 11kW;1x 26m^3, 3kW, 2x 150m^3/h, 18 kW], 3x deskový výměník (2x2,4 MW + 1x 0,5 MW), 2x ventilátor (550 m^3/h, 3 kW; 1500m^3/h, 0,75 kW), 1x silo pro usušený kal (110m^3), prachový filtr (8 m^2), bezpečnostní měřící zařízení, software, elektro-instalace, výstavba, zkoušení

Cena dodávky (bez DPH): 2 017 000 Euro

4. Technologie sušení kalů v tenkovrstvé vysokootáčkové sušárně

Italská firma Vomm nabízí pro sušení kalů tenko-vrstvou vysoko-otáčkou sušárnu s kombinovaným vyhříváním (přímo i nepřímo vyhřívaná), (viz obr. 36).



Obr. 36 Technologie firmy Vomm pro sušení kalů v tzv. uzavřeném systému (close loop system)

Popis technologie: Kal je nejdříve dopravený šnekovým čerpadlem do rotační sušárny. Zde je za vysokých otáček rotoru docíleno velké plochy výměny tepla a dokonalého promísení kalu. Sušárna Turbo-Dryer je vyhřívaná nepřímo (v koaxiálním plášti) olejem a částečně vzduchem (cca 260°C) předehřátým ve výměníku olej/vzduch. Kal i sušící vzduch jsou vedeny souproudně. Odtud odchází kal spolu s brýdovými parami do cyklónu, kde dochází k jejich separaci. Kal je po separaci chlazen vodou ve výstupním šnekovém dopravníku pod teplotu 50°C. Brýdové páry s procesním vzduchem dále prochází mokrou vypírkou. Kondenzát se vzduchem je veden do hydro-separátoru, kde dochází k jejich rozdělení. Odpadní voda je částečně vracena do vypírky, zbytek je odveden do čistírny odpadních vod. Procesní vzduch oddělený v hydro-separátoru je po ohřátí na teplotu veden zpět do sušárny.

Základní technické údaje:

Počet linek: 2
Množství vlhkého kalu: 6000 kg/h
Výstup. množství sušiny kalu: 1400 kg/h
Odpar vody: 4600 kg/h
Výstupní teplota kalu: <50°C
Obsah sušiny vlhkého kalu: 21 %
Obsah sušiny usušeného kalu: 90 %
Teplota oleje: 280/240 °C
Spotřeba elektrické energie: 380 kW

Obchodní údaje:

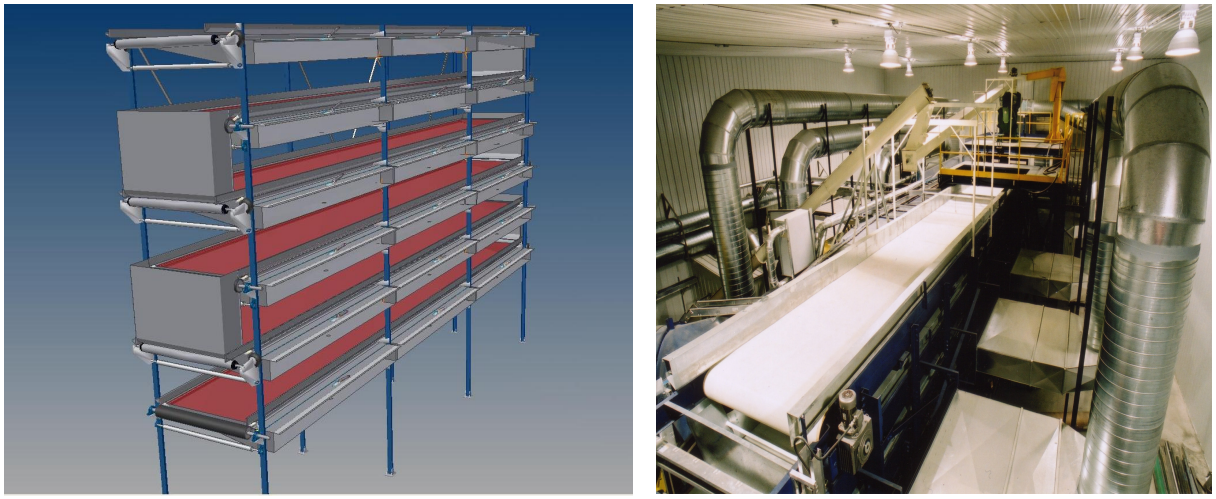
Rozsah dodávky: násypka kalu, dávkovací čerpadlo pro odvodněný kal, sušárna Turbo-Dryer, 2x ventilátor, 2x výměník (olej/vzduch, chladící voda/kondenzát), cyklón, mokrá vypírka, chladící věž, dopravník usušeného kalu, dohled nad výstavbou a instalací

Dodávka nezahrnuje: stavební práce (včetně zdiva), balení a doprava, montáž a instalace, uvedení do provozu a zkoušky, elektro-instalace, potrubí, náhradní části, záložní zařízení, zařízení na vyjmutí turbíny ze sušárny, olejový okruh, olejovou náplň, výměník spaliny/olej.

Cena dodávky:	3 270 000 Euro
Příplatek za dodávku na klíč:	450 000 Euro

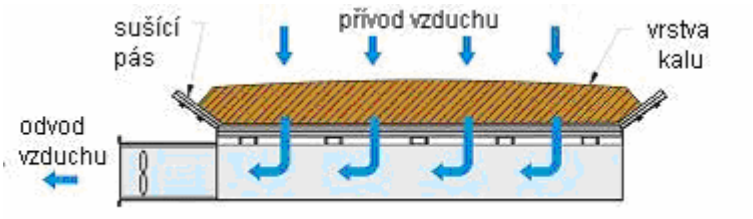
5. Technologie sušení kalů na pásové sušárně

Kanadská firma Mabarex nabídla technologii pro sušení kalů s pásovou (vzduchem vyhřívanou) sušárnu, která je znázorněna na obr. 37.



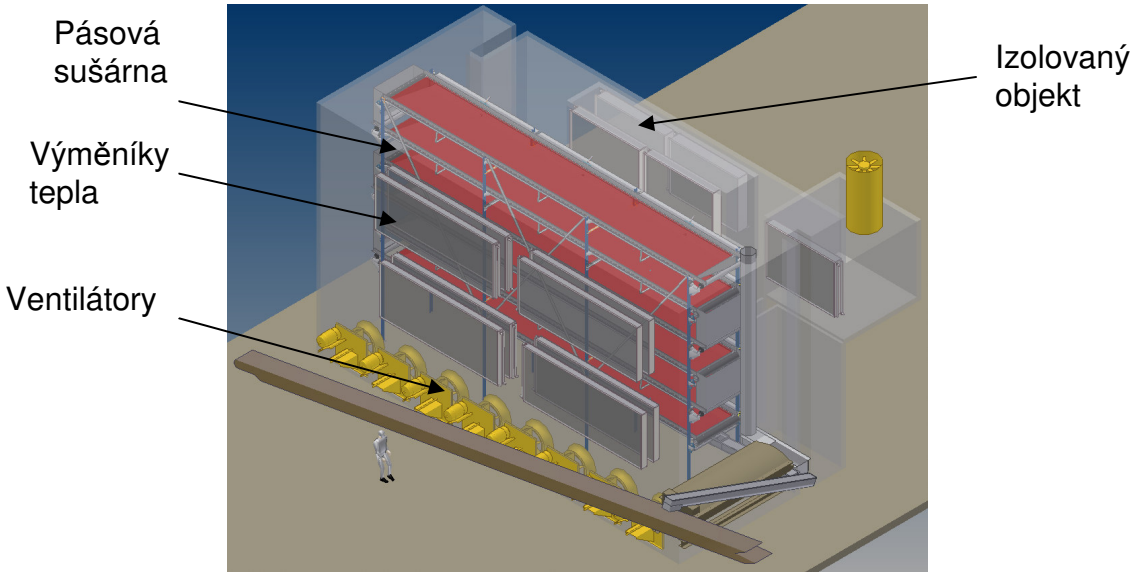
Obr. 37 Pásová sušárna Dry–Rex pro sušení kalů z čistíren odpadních vod

Popis technologie: Technologie firmy Mabarex je založena na sušení kalů na pásové etážové sušárně vyhřívané vzduchem. Teplota vzduchu je poměrně nízká a pohybuje se mezi 10 až 90 °C, čímž je bráněno tvorbě VOC (prchavé organické látky), nepříjemných pachů, ale také možnosti odpařování nebezpečných látek z kalu jako např. rtuť. Kal je před vstupem do sušárny protlačen na lisu do tvaru nudlí a za pomocí zdvihacího síta je dopraven na vrchní patro. Vzduch ohřátý ve výměnících tepla (voda/vzduch) je nasáván přes vrstvu kalu do děrovaného pásu (viz obr. 16), čímž je zároveň dosaženo větší míry odpaření. Vzduch určený pro vytápění sušárny cirkuluje až do nasycení, a odchází ze sušárny s relativní vlhkostí okolo 95 %. Množství par odcházejících do ovzduší je minimalizováno, umístněním výměníku tepla, kde kondenzuje část par. Tím je snížena teplota a objem par, čímž je snížena možnost vzniku nepříjemného zápachu. Teplo získané ve výměníku je pak použito pro předehřev vzduchu určeného k vytápění sušárny.



Obr. 38 Sušení kalu na pásu sušárny Dry-Rex

Celé zařízení je pak umístněno v uzavřené izolované budově (viz obr. 38).



Obr. 39 Zařízení pro sušení kalů umístněného do izolovaného objektu

Základní technické údaje:

Počet linek: 1
Množství vlhkého kalu: 6000 kg/h
Množství usušeného kalu: 1327 kg/h
Odpar vody: 4673 kg/h
Pracovní teplota: 10 až 90 °C
Hmotnost: < 10 000 kg

Obsah sušiny vlhkého kalu: 21 %
Obsah sušiny usušeného kalu: cca 95 %
Spotřeba el. energie: 100 až 150 kW

Obchodní údaje:

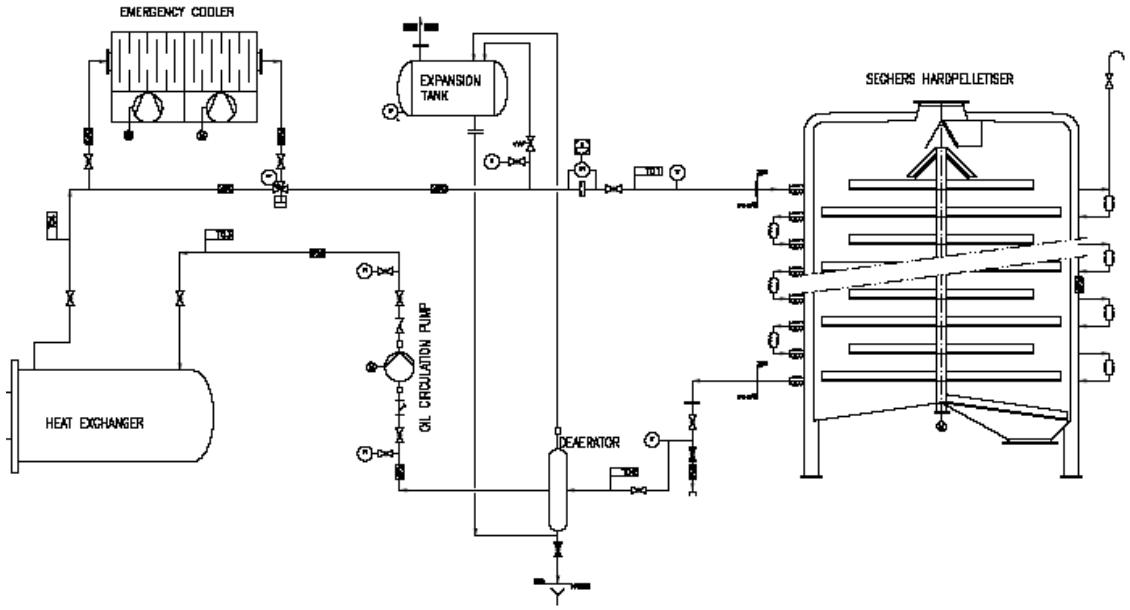
Rozsah dodávky: pásová sušárna Dry-Rex, všechny výměníky a ventilátory, protlačovací zařízení, veškerá regulace a řízení, spouštěče motorů, izolovaný obestavěný prostor

Dodávka nezahrnuje: betonovou základnu, vstupní a výstupní dopravníky kalu, instalaci zařízení

Předběžná cena: *900 000 Euro*

6. Technologie sušení kalů v etážové sušárně

Od firmy Seghers byla nabídnuta etážová, olejem (nepřímovýhřívaná) sušárna, jak můžeme vidět na obr. 40.



Obr. 40 Sušení kalů v etážové sušárně

Popis technologie: Mechanicky odvodněný kal, uložený v silu je nejdříve transportován do tzv. obalovače (coater) prostřednictvím šnekových dopravníků. Násypka nad obalovačem umožňuje kontinuální, plynulé dávkování. V obalovači jsou smíchány recirkulované peletky s vstupujícím odvodněným kalem a dávkovány do sušárny, ve které je kal posouván prostřednictvím rotačních ramen od vrchu směrem ke dnu. Při tomto procesu vznikají granule (peletky), které jsou po usušení dopravovány elevátorem do rozdružovací násypky. Část peletek se recirkuluje pro smíchání se vstupujícím odvodněným kalem a část odchází do skladovacího sila, předtím jsou však peletky ochlazeny pod 40 °C, kvůli zamezení možnosti samovznícení.

Energie potřebná k odpaření vody v kalu je dodávána prostřednictvím teplonosného oleje, protékajícího přes sušárnu (nazývána je též paletizátorem - pelletizer). Olej je vysoce kvalitní, minerální, ohřívaný prostřednictvím spalin v rekuperačním výměníku. Oběh v systému zajišťuje odstředivé čerpadlo. Olej protéká též deaerátorem a expanzní nádobou umožňující tepelnou expanzi oleje a odvzdušnění a odvodnění systému během najíždění. Odstavení a havarijní chlazení zajišťuje deskový výměník olej/ vzduch., umožňující velmi rychlé vychlazení.

Brýdové páry jsou ventilátorem za mírného podtlaku odtahovány do kontaktního kondenzátoru, kde kondenzují ochlazením na cca 50 °C a odcházejí do ČOV. Existuje též možnost využití tepla par pro předehřev vody či kalu. Malé množství nezkondenzovaných par je možné zneškodnit např. využitím jako spalovacího vzduchu, nebo v jednotce pro zneškodnění zápachu.

Základní technické údaje:

Počet linek: 1
Množství vlhkého kalu: 6000 kg/h
Množství usušeného kalu: 1219 kg/h
Odpar vody: 4063 kg/h
Pracovní teplota: neuvedena
Obsah sušiny vlhkého kalu: 30%
Obsah sušiny usušeného kalu: > 90 %
Spotřeba el. energie: cca 160 kW

Obchodní údaje:

Rozsah dodávky: sušárna Seghers Pelletiser, dávkovací násypka a obalovač, regulace a řízení procesu, plošiny a podpěrné konstrukce spojené se zařízením, testování, dohled při montáži, uvedení do provozu, základní návrh zařízení.

Dodávka nezahrnuje: recirkulace a doprava kalu, chlazení výstupního kalu, olejový systém, systém zpracování par, ostatní ocelové konstrukce, nátěry a izolace, měření, kabeláž, rozvodné elektro skříně, stavební práce, doprava, příjímací a skladovací silo, výstavba, software, zpracování zápachu.

Předběžná cena: *1 600 000 Euro*

Příloha 5 - Odvození součinitele tlakové ztráty ξ pro proudění spalin přes svazek trubek [54]

Součinitel tlakové ztráty při izotermním proudění pro svazek trubek s přesazeným uspořádáním s vrcholovým úhlem 60° a počtem řad N_R větším než deset je dle [54] možné určit podle následujícího vztahu:

$$\xi = \xi_l + \xi_t \left[1 - \exp\left(- \frac{\mathrm{Re}_S + 200}{1000} \right) \right],$$

(0-1)

kde ξ_l a ξ_t jsou součinitele tlakové ztráty při laminárním a turbulentním proudění. Součinitel tlakové ztráty ξ_l při laminárním proudění je vyjádřen vztahem:

$$\xi_l = \frac{f_{u,l}}{\mathrm{Re}_S}, \tag{0-2}$$

kde $f_{u,l}$ je faktor uspořádání při laminárním proudění, definovaný následovně:

$$f_{u,l} = \frac{280 \cdot \pi \cdot \left[\left(b^{0,5} - 0,6 \right)^2 + 0,75 \right]}{\left(4 \cdot a \cdot b - \pi \right) \cdot a^{1,6}} \tag{0-3}$$

Součinitel tlakové ztráty ξ_t při turbulentním proudění je vyjádřen jako:

$$\xi_t = \frac{f_{u,t}}{\mathrm{Re}_S^{0,25}}, \tag{0-4}$$

kde $f_{u,t}$ je faktor uspořádání při turbulentním proudění, definovaný následovně:

$$f_{u,t} = 2,5 + \left(\frac{1,2}{\left(a - 0,85 \right)^{1,08}} \right) + 0,4 \cdot \left(\frac{b}{a} - 1 \right)^3 - 0,01 \cdot \left(\frac{a}{b} - 1 \right)^3 \tag{0-5}$$

Vliv neizotermního proudění se u celkového součinitele tlakové ztráty vyjádřeného rovnicí
(0-1) zohledňuje korekčními faktory $f_{z,l}$ a $f_{z,t}$ pro laminární a turbulentní proudění, kterými se vynásobí příslušné součinitele tlakové ztráty při laminárním a turbulentním proudění.

Tyto korekční faktory jsou definovány jako:

$$f_{z,l} = \left(\frac{\eta_{S,W}}{\eta_S}\right)^{\left\{\frac{0,57}{\left[\left(\frac{4\cdot a\cdot b}{\pi}\right)-1\right]^{0,25}}\right\}} \quad \text{a} \quad f_{z,t} = \left(\frac{\eta_{S,W}}{\eta_S}\right)^{0,14}, \qquad \text{(0-6) (0-7)}$$

kde $\eta_{S,W}$ je dynamická viskozita spalin při střední teplotě stěny trubky t_W (viz rovnice (6-11)).

Vliv počtu řad N_R je zohledněn následovně:

- Při počtu řad $5 \leq N_R < 10$ se k turbulentnímu součiniteli tlakové ztráty v rovnici (0-1) přičte člen $f_{n,t}$:

$$f_{n,t} = \frac{1}{a^2}\cdot\left(\frac{1}{N_R} - \frac{1}{10}\right) \qquad \text{(0-8)}$$

  Pro $N_R \geq 10$ je $f_{n,t}=0$.

- Při počtu řad $N_R<10$ a neizotermním proudění se korekční faktor pro laminární proudění $f_{z,l}$ (rovnice (0-6)) nahradí faktorem $f_{zn,l}$:

$$f_{zn,l} = \left(\frac{\eta_{S,W}}{\eta_S}\right)^{\left\{\frac{0,57\cdot\left(\frac{N_R}{10}\right)^{0,25}}{\left[\left(\frac{4\cdot a\cdot b}{\pi}\right)-1\right]^{0,25}}\right\}} \qquad \text{(0-9)}$$

  Pro $N_R \geq 10$ je $f_{zn,l}=f_{z,l}$.

Uvažujeme-li tedy počet řad vyšší než deset a neizotermní proudění, dostává rovnice (0-1) následující tvar:

$$\xi = \xi_l \cdot f_{z,l} + \xi_t \cdot f_{z,t} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\mathrm{Re}_S + 200}{1000}\right)\right], \qquad \text{(0-10)}$$

Při znalosti výše uvedených vztahů pro určení součinitelů tlakové ztráty při laminárním a turbulentním proudění, příslušných korekčních faktorů a vztahu pro výpočet Reynoldsova čísla je možné celkový součinitel tlakové ztráty rovnice (0-10) vyjádřit vztahem (6-10).

Příloha 6 - Strojně technologické schéma olejového okruhu

Viz výkres přiložený jako samostatný soubor ve formátu pdf.

Příloha 7 - Tabulka vlastností teplonosného oleje Terminol 66 [64]

PROPERTIES OF THERMINOL® 66

Temperature		Liquid Density			Liquid Heat Capacity		Liquid Enthalpy**		Heat of Vaporization	
°F	°C	lb/gal	lb/ft³	kg/m³	Btu/lb-°F [cal/g-°C]	kJ/kg•K	Btu/lb	kJ/kg	Btu/lb	kJ/kg
20	-7	8.56	64.0	1026	0.352	1.47	7.0	16.2	179.6	417.5
30	-1	8.53	63.8	1022	0.356	1.49	10.5	24.4	178.5	414.8
40	4	8.50	63.6	1019	0.361	1.51	14.1	32.7	177.3	412.2
60	16	8.44	63.1	1011	0.370	1.55	21.4	49.7	175.1	407.1
80	27	8.38	62.7	1003	0.379	1.58	28.9	67.1	173.0	402.0
100	38	8.32	62.2	997	0.388	1.62	36.5	84.9	170.8	397.1
120	49	8.26	61.8	989	0.397	1.66	44.4	103.2	168.7	392.2
140	60	8.19	61.3	982	0.406	1.70	52.4	121.8	166.7	387.5
160	71	8.13	60.8	974	0.415	1.74	60.6	140.9	164.7	382.8
180	82	8.07	60.4	967	0.424	1.78	69.0	160.5	162.7	378.3
200	93	8.01	59.9	960	0.434	1.81	77.6	180.4	160.8	373.8
220	104	7.94	59.4	952	0.443	1.85	86.4	200.8	158.9	369.3
240	116	7.88	59.0	944	0.452	1.89	95.3	221.6	157.0	365.0
260	127	7.82	58.5	937	0.462	1.93	104.5	242.8	155.2	360.6
280	138	7.75	58.0	929	0.471	1.97	113.8	264.5	153.3	356.4
300	149	7.69	57.5	921	0.480	2.01	123.3	286.6	151.5	352.1
320	160	7.62	57.0	914	0.490	2.05	133.0	309.2	149.7	347.9
340	171	7.56	56.5	906	0.500	2.09	142.9	332.2	147.9	343.8
360	182	7.49	56.1	898	0.509	2.13	153.0	355.6	146.1	339.6
380	193	7.43	55.6	890	0.519	2.17	163.3	379.5	144.3	335.4
400	204	7.36	55.1	882	0.528	2.21	173.7	403.8	142.5	331.2
420	216	7.29	54.5	874	0.538	2.25	184.4	428.6	140.7	327.0
440	227	7.22	54.0	866	0.548	2.29	195.2	453.8	138.9	322.8
460	238	7.15	53.5	857	0.558	2.33	206.3	479.6	137.0	318.5
480	249	7.08	53.0	849	0.568	2.38	217.6	505.7	135.2	314.2
500	260	7.01	52.5	840	0.578	2.42	229.0	532.3	133.3	309.8
520	271	6.94	51.9	832	0.588	2.46	240.7	559.4	131.3	305.3
540	282	6.87	51.4	823	0.598	2.50	252.5	587.0	129.4	300.7
560	293	6.79	50.8	814	0.608	2.54	264.6	615.0	127.4	296.0
580	304	6.72	50.2	805	0.618	2.59	276.8	643.5	125.3	291.2
600	316	6.64	49.7	796	0.628	2.63	289.3	672.5	123.2	286.3
620	327	6.56	49.1	786	0.639	2.67	302.0	701.9	121.0	281.2
640	338	6.48	48.5	777	0.649	2.72	314.9	731.9	118.7	276.0
650	345	6.44	48.2	772	0.655	2.74	321.4	747.0	117.6	273.3
660	349	6.40	47.9	767	0.660	2.76	328.0	762.3	116.4	270.5
680	360	6.32	47.3	757	0.671	2.81	341.3	793.2	113.9	264.9
700	371	6.23	46.6	747	0.682	2.85	354.8	824.7	111.4	259.0

* Maximum recommended bulk temperature 650 °F (345 °C).
† These data are based upon samples tested in the laboratory and are not guaranteed for all samples. Write us for complete sales specifications for Therminol 66 fluid.
** The liquid enthalpy basis is zero at 0 °F.

HEAT TRANSFER FLUID*†

Liquid Thermal Conductivity			Liquid Viscosity			Vapor Pressure				Temperature	
Btu/ ft-hr-°F	kcal/ m-hr-°C	W/m•K	lb/ft-hr	cSt [mm²/s]	cP [mPa•s]	psia	mm Hg	kgf/cm²	kPa	°F	°C
0.0685	0.1020	0.1185	10070	4060	4160					20	-7
0.0684	0.1018	0.1183	3820	1544	1579					30	-1
0.0683	0.1016	0.1181	1679	681	694					40	4
0.0681	0.1013	0.1177	456	186.3	188.4					60	16
0.0678	0.1009	0.1173	171.9	70.8	71.0					80	27
0.0675	0.1005	0.1168	81.2	33.7	33.6					100	38
0.0672	0.1001	0.1163	45.0	18.78	18.58					120	49
0.0669	0.0996	0.1158	27.9	11.74	11.53					140	60
0.0666	0.0991	0.1152	18.79	7.97	7.77	0.0016	0.085	0.00012	0.011	160	71
0.0662	0.0986	0.1145	13.48	5.76	5.57	0.0029	0.15	0.00021	0.020	180	82
0.0658	0.0980	0.1139	10.14	4.37	4.19	0.0051	0.26	0.00036	0.035	200	93
0.0654	0.0974	0.1132	7.91	3.44	3.27	0.0086	0.45	0.00061	0.060	220	104
0.0650	0.0967	0.1124	6.36	2.78	2.63	0.014	0.74	0.0010	0.098	240	116
0.0646	0.0961	0.1117	5.23	2.31	2.16	0.023	1.2	0.0016	0.16	260	127
0.0641	0.0954	0.1108	4.39	1.951	1.813	0.036	1.9	0.0025	0.25	280	138
0.0636	0.0946	0.1100	3.74	1.677	1.545	0.056	2.9	0.0039	0.38	300	149
0.0631	0.0939	0.1091	3.23	1.461	1.335	0.084	4.3	0.0059	0.58	320	160
0.0625	0.0931	0.1082	2.82	1.289	1.167	0.125	6.4	0.0088	0.86	340	171
0.0620	0.0922	0.1072	2.49	1.148	1.031	0.182	9.4	0.0128	1.26	360	182
0.0614	0.0914	0.1062	2.22	1.032	0.918	0.262	13.5	0.0184	1.80	380	193
0.0608	0.0905	0.1051	1.995	0.935	0.825	0.370	19.1	0.0260	2.55	400	204
0.0602	0.0895	0.1040	1.805	0.854	0.746	0.517	26.7	0.0363	3.56	420	216
0.0595	0.0886	0.1029	1.643	0.785	0.679	0.712	36.8	0.0501	4.91	440	227
0.0588	0.0876	0.1018	1.504	0.725	0.622	0.969	50.1	0.0681	6.68	460	238
0.0581	0.0865	0.1006	1.384	0.674	0.572	1.30	67.4	0.0916	8.98	480	249
0.0574	0.0855	0.0993	1.280	0.629	0.529	1.73	89.6	0.122	12.0	500	260
0.0567	0.0843	0.0980	1.188	0.591	0.491	2.28	118	0.160	15.7	520	271
0.0559	0.0832	0.0967	1.108	0.557	0.458	2.97	154	0.209	20.5	540	282
0.0552	0.0821	0.0954	1.037	0.527	0.429	3.84	199	0.270	26.5	560	293
0.0543	0.0809	0.0940	0.974	0.500	0.403	4.91	254	0.346	33.9	580	304
0.0535	0.0796	0.0926	0.918	0.477	0.379	6.24	323	0.439	43.0	600	316
0.0527	0.0784	0.0911	0.868	0.456	0.359	7.85	406	0.552	54.2	620	327
0.0518	0.0771	0.0896	0.822	0.438	0.340	9.81	508	0.690	67.7	640	338
0.0514	0.0764	0.0888	0.801	0.429	0.331	10.9	566	0.769	75.4	650	345
0.0509	0.0757	0.0880	0.781	0.421	0.323	12.2	630	0.856	83.9	660	349
0.0500	0.0744	0.0865	0.744	0.407	0.308	15.0	776	1.05	103	680	360
0.0491	0.0730	0.0848	0.711	0.393	0.294	18.4	949	1.29	127	700	371

TECHNICAL SERVICE HOTLINE (800) 433-6997

THERMINOL 66
Heat Transfer Fluid by Solutia

Příloha 8 - Měření a regulace (MaR) olejového okruhu a sušárny

Veličina / čidlo	Počet kusů	Podmínky měření	Místní / velín	Poznámky/akční člen
Tlak				
tlakoměr	3	provozní teplota 200 °C, provozní tlak 0.9 MPa	Vyvedení na velín	Měření tlaku v olejovém potrubí (sání, výtlak čerpadel)
tlakoměr	4	provozní teplota 80 °C, max. provozní tlak – 0.4 MPa	Vyvedení na velín	Měření tlaku v potrubí pro olej (sání, výtlak čerpadel),
Diferenční tlakoměr	1	provozní teplota 200°C,	Vyvedení na velín	Měření tlakové ztráty filtru oleje,
tlakoměr	2	Tlak vzduchu – tlak do 70kPa	Místní čidlo	Měření tlaku vzduchu v meziprostoru dvouplášťové nádrže
tlakoměr	2	Měření tlaku na dně nádrží – tlak do 30 kPa	Vyvedení na velín	
Teplota				
teploměr	2	provozní teplota 200°C	Vyvedení na velín	Měření teploty oleje v potrubí / Při zvýšení nad 220°C, signalizace alarmu na velínu.
Průtok				
Clona s tlakoměrem	1	Průtok 80 až 100 l/s, DN 200, hustota oleje 900kg/m^3	Vyvedení na velín	Měření průtoku oleje na výtlaku čerpadel, průtok oleje
Měření hladiny				
Plovákový měřicí přístroj	2	Olej, provozní teplota 80, max. 160 °C	Vyvedení na velín	Spojité měření hladiny ve skladovacích nádržích
	4	Měření hladiny oleje – 160 °C, pouze min. a max. hladina	Vyvedení na velín	U jednoho z hladinoměrů při poklesu hladiny pod min. => vypnutí oběhových čerpadel
	2	Hladinový spínač	Vyvedení na velín	

Příloha 9 - Přehled a ocenění armatur olejového okruhu

Jmenovitý průměr potrubí	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	**Suma Kč**
Armatura	10	25	32	40	50	80	100	150	200	
Kohout		1000	1000	14000	2000	56000				74000,0
Ventil uzavírací ruční	7765	6212	1729			3858	10868	46038		76470,0
Ventil regulační							10000	24000		34000,0
Ventil regulační s elektropoh.							24825	71400		96225,0
Šoupátko									36000	36000,0
Klapka								8000		8000,0
Zpětná klapka				2000		3000		10000		15000,0
Filtr				1000		3000		30000		34000,0
Pojistný ventil		7000		12000		16000				35000,0
Příruby		810	440	2100	174	4958	1467	7140	3720	20809,0
										429504,0

Poznámka: V jednotlivých políčkách je vidět pouze výsledná cena dané armatury,
která je složená ze součinu počet x cena

Příloha 10 - Stanovení investičních nákladů projektu

Technologie sušení kalu

Název zařízení, příslušenství	Hmotnost	Cena/ks	Počet	Cena
	kg	Kč	ks	Kč
Strojní část				
Zařízení 1 - Sběrná násypka				**162 519**
ocelová konstrukce	1220			97 600
Nátěry				18 600
Montáž				24 400
Spojovací materiál, těsnění	5	8 500	1	8 500
celkem				149 100
rezerva		9,00%		13 419
Zařízení 2 - Silo				**4 000 000**
Zařízení 3 - Šnekový dopravník či schwing				**2 000 000**
Zařízení 4 - Sušárna s výstupním dopravníkem				**35 792 820**
Sušárna s výstupním dopravníkem	63000		1	**26 301 000**
Měření a regulace				1 188 000
Elektrický a měřící panel (deska)				2 838 000
Basic engineering				1 914 000
General services				1 419 000
Izolace				54 000
Přístupové plošiny				100 000
Montážní práce				1 260 000
Spojovací materiál	10	17 000	1	17 000
celkem				35 091 000
rezerva		2,00%		701 820
Zařízení 5 - Šnekové dopravníky				**544 720**
recyklační šnekový dopravník	780	115 000	2	230 000
šnekový dopravník - back mixing	500	1		94 000
výstupní, chlazený šnekový dopravník	340	1		132 000
Spojovací materiál	4			6 800
Montáž				32 400
celkem				495 200
rezerva		10,00%		49 520

Zařízení 6 - cyklón				**29 073**
cyklon	116		1	16 000
Izolace				5 553
Spojovací materiál, těsnění	1,5	2 550		2 550
Montáž				2327
celkem				26 430
rezerva		10,00%		2 643
Zařízení 7 - kondenzátor				**372 653**
kondenzátor	577			201 963
ventilátor				16 500
čerpadlo pro přívod tlakové vody				86 845
Tryska		1 980	5	9 900
Demister		13 200	1	13 200
Montážní práce				11 541
spojovací materiál, těsnění	3	5 100		5 100
celkem				345 049
rezerva		8,00%		27 604
Zařízení 8 - Fluidní doprava				**1 000 000**
Potrubí a jeho potřebná izolace				**1 473 845**
potrubí - doprava kalu	1893			246 086
potrubí - pára ze sušárny do kondenz.	205			51 230
potrubí - přívod vody	6469			840 994
Montáž vzduchotechniky a OK				171 341
Spojovací materiál, těsnění	25	42 500	1	42 500
celkem				1 352 151
rezerva		9,00%		121 694
Strojní část celkem				**45 375 630**
Elektro část, MaR - viz olej okruh				
Stavební část				
Stavební část				**6 050 000**
Hala pro sušárnu				5 500 000
celkem				5 500 000
rezerva		10,00%		550 000

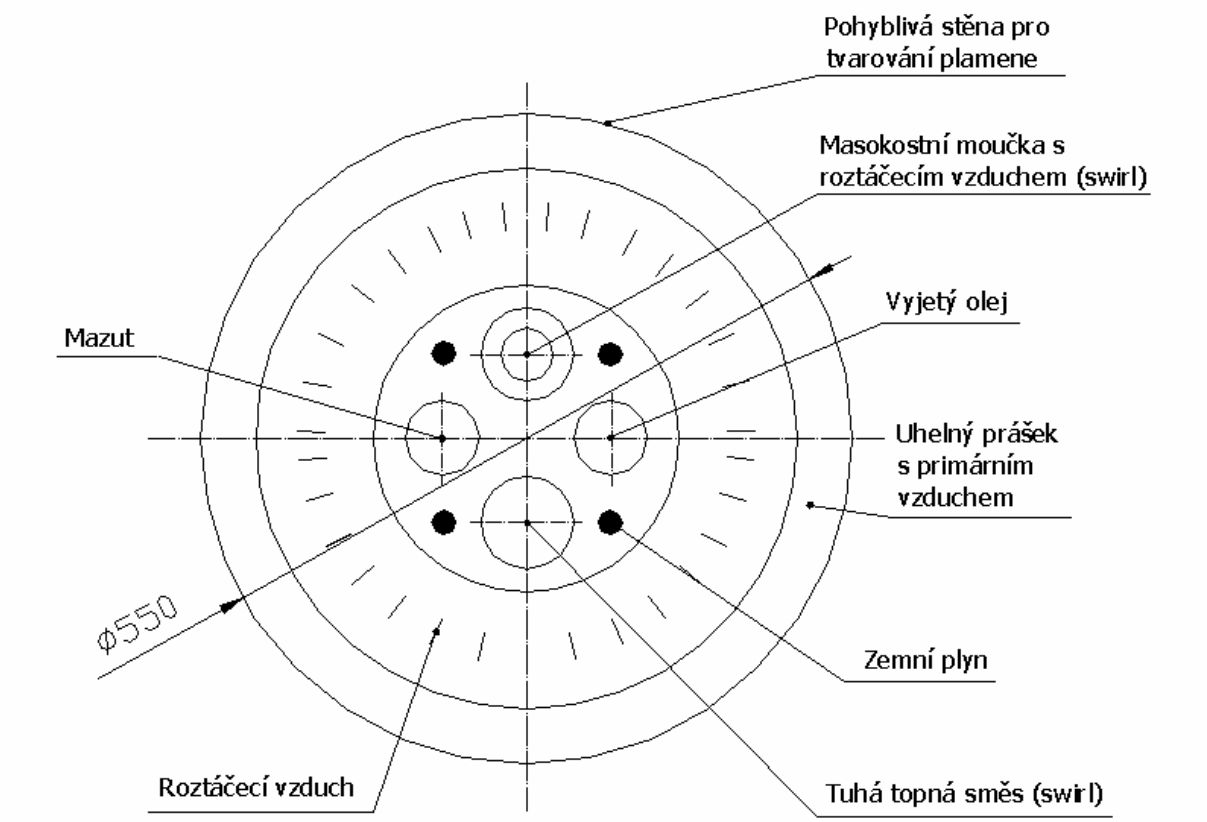
Olejový okruh

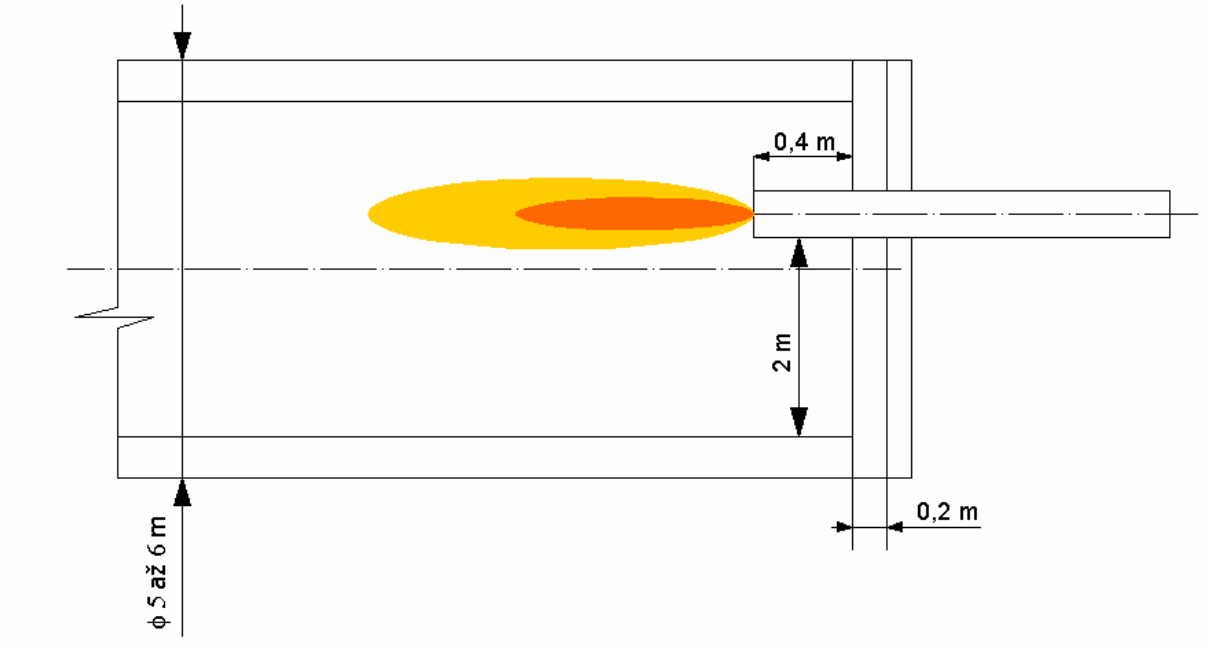
Název	Hmotnost	Cena/ks	Počet ks	Cena
	kg	Kč	ks	Kč
Strojní část				
Nádrže				**2 016 277**
Skladovací nádrž	5483	712 765	2	1 425 531
Expanzní nádrž	365	47 431	1	47 431
Záchytná nádrž		47 431	1	47 431
Izolace				131 964
Montáž				233 907
Spojovací materiál	20	1 700		34 000
celkem				1 920 264
rezerva		5,00%		96 013
Výměník spaliny olej				**3 241 700**
Výměník spaliny olej				2 551 000
Izolace				96 000
Montáž				300 000
celkem				2 947 000
rezerva		10,00%		294 700
Čerpadla				484 660
Oběhová čerpadla (75kW)		150 300	2	300 600
Manipulační čerpadlo (5,5kW)		40 000	3	120 000
Čerpadlo sběrné jímky (1kW)		20 000	1	20 000
celkem				440 600
rezerva		10,00%		44 060
Potrubí				342 776
potrubí f 194x6 l=65m				248 507
izolace				63 107
celkem				311 614
rezerva		10,00%		31 161
Armatury				**471 900**
Armatury (ventily, klapky, filtry, …)				429 000
celkem				429 000
rezerva		10,00%		42 900
Olej - Slovterm				**447 700**
Cena oleje - Slovterm (Slovnaft - do 290°C)				407 000

celkem				407 000
rezerva		10,00%		40 700
Strojní část celkem				**7 005 013**
Stavební část				
Stavební část				**1 870 000**
Hala pro olejové hospodářství				1 700 000
celkem				1 700 000
rezerva		10,00%		170 000
Elektro část				
Elektro, měření a regulace + elektro rozvody				**1 750 000**

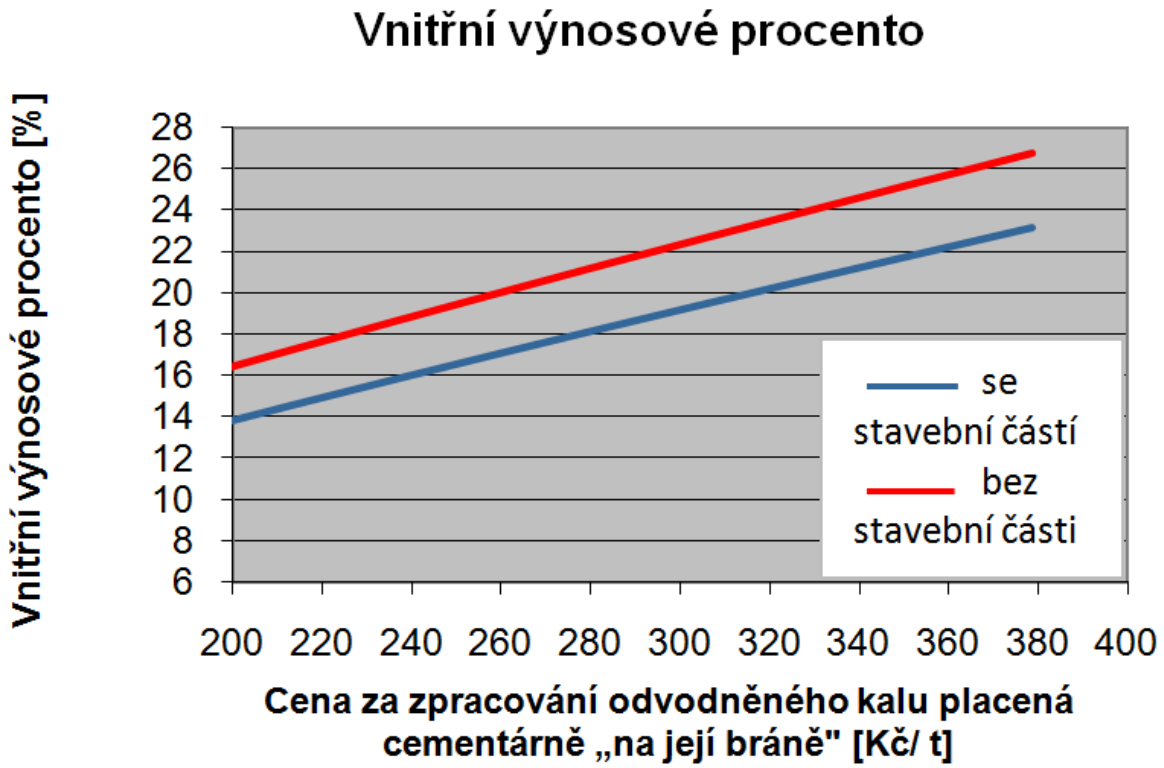
Rekapitulace technologie sušení	**Cena [Kč]**
Strojně technologické zařízení vč. vyzdívek, demontáže, montáže a nátěrů	45 375 630
Elektro, měření a regulace, řízení vč. Montáže - viz olej okruh	
Stavební část	6 050 000
Celková cena technologie sušení se stavební části	**51 425 630**
Celková cena technologie sušení bez stavební části	**45 375 630**
Rekapitulace olejového okruhu	**Cena [Kč]**
Strojně technologické zařízení vč. vyzdívek, demontáže, montáže a nátěrů	7 005 013
Elektro, měření a regulace, řízení vč. montáže	1 750 000
Stavební část	1 870 000
Celková cena zařízení pro olej okruh se stavební částí	**10 625 013**
Celková cena olejového okruhu bez stavební části	**8 755 013**
Ostatní náklady výše neuvedené	**Cena [Kč]**
Doprava (sušárna, výměník, potrubí, čerpadel, izolací,…)	150 000
Inženýring, kompletační přirážka, autorský dozor, se stavební částí	4 653 798
servis, školení, uvedení do provozu bez stavební části	4 059 798
Celkem se stavební částí	**4 803 798**
Celkem bez stavební části	**4 209 798**
Celková cena projektu se stavební částí	**66 854 440**
Celková cena projektu bez stavební části	**58 340 440**

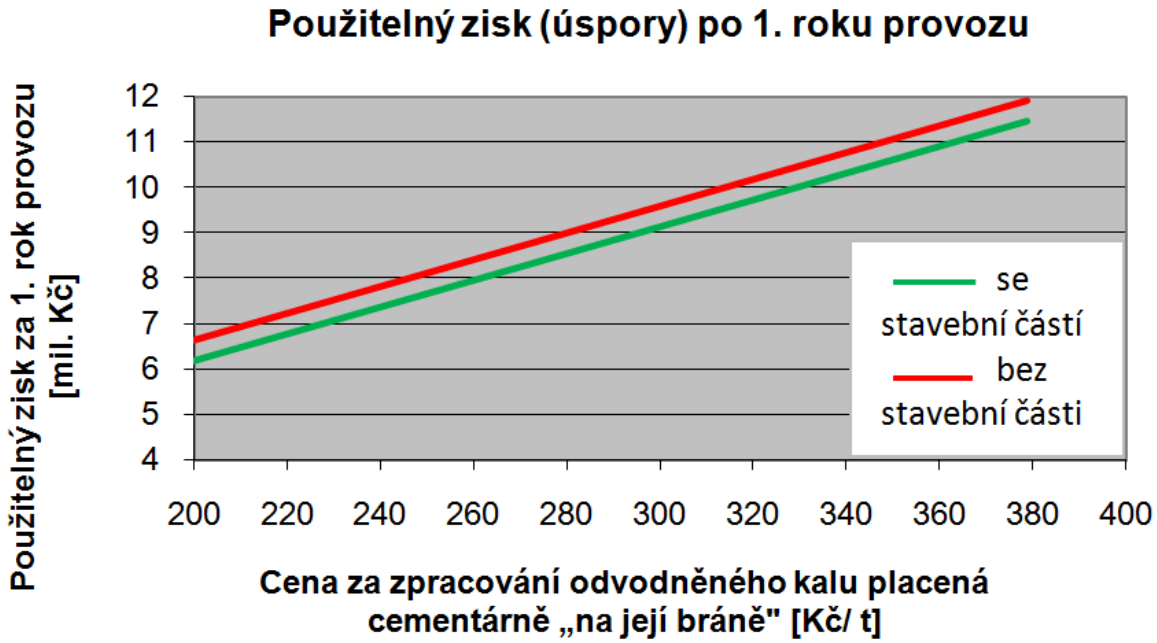
Příloha 11 - Kombinovaný hořák Unitherm rotační pece cementárny pro spalování kapalných, tuhých i plynných paliv [81]

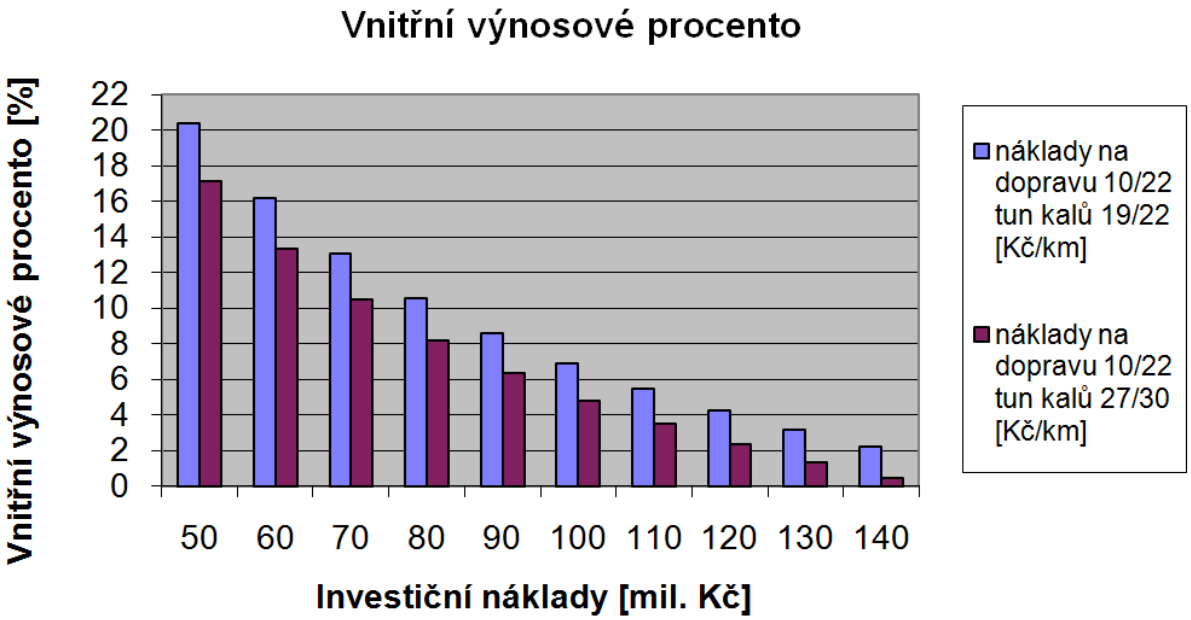


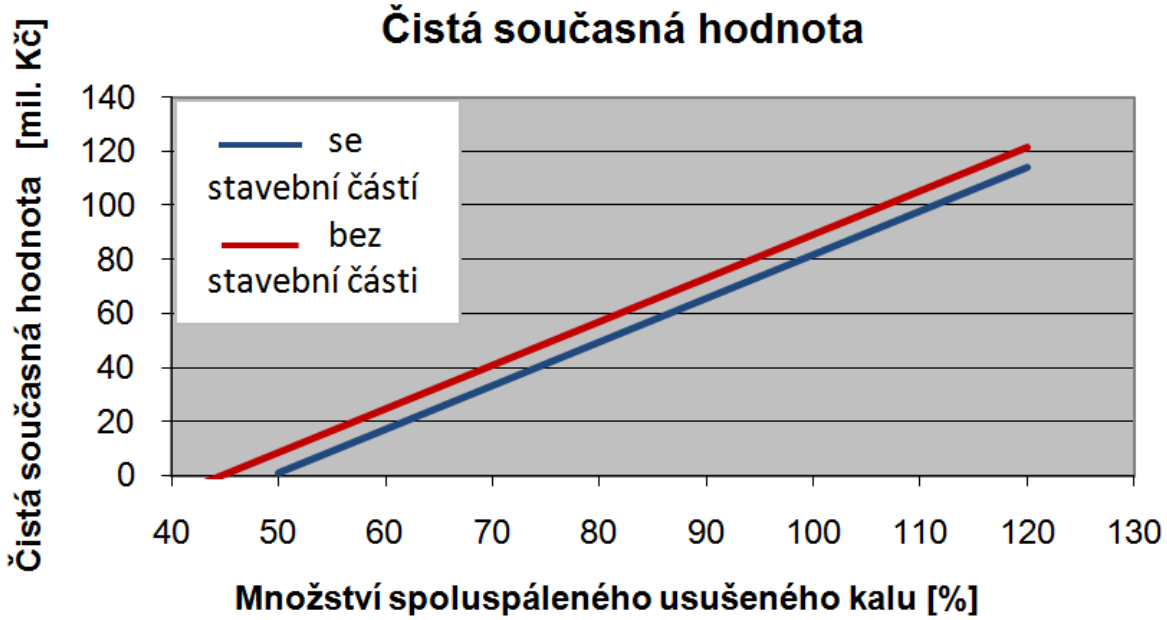


Příloha 12 - Další ukazatele ekonomického hodnocení investice






Vnitřní výnosové procento
Vnitřní výnosové procento [%]
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
50 60 70 80 90 100 110 120 130 140
Investiční náklady [mil. Kč]
náklady na dopravu 10/22 tun kalů 19/22 [Kč/km]
náklady na dopravu 10/22 tun kalů 27/30 [Kč/km]


Čistá současná hodnota
Čistá současná hodnota [mil. Kč]
140
120
100
80
60
40
20
0
40 50 60 70 80 90 100 110 120 130
Množství spoluspáleného usušeného kalu [%]
se stavební částí
bez stavební části