

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

METODY TERMICKÉHO ZNEŠKODNĚNÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

METHODS OF SEWAGE SLUDGE THERMAL TREATMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LENKA ROSENDORFOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. LUCIE HOUDKOVÁ

BRNO 2008

ABSTRAKT

První část této diplomové práce se zabývá vytvořením přehledu metod termického zneškodnění čistírenských kalů. Čistírenský kal je rizikovým materiálem, který vzniká při procesu čištění odpadních vod. Je v něm silně zkoncentrováno znečištění z původní odpadní vody. Škála různých metod konečného zneškodnění kalů je velmi široká, termické metody patří k těm v současnosti nejperspektivnějším. V dnešní době, kdy se legislativní předpisy a nařízení pro čištění odpadních vod stále zpřísnují, je nakládání s kalem problematické nejen z hlediska ekologického, ale i ekonomického.

Druhá část diplomové práce se zabývá výhledovým hospodařením s kaly na Ústřední čistírně odpadních vod Praha, a to variantou sušení a následného spalování směsného surového kalu.

Klíčová slova:

čistírna odpadních vod, čistírenský kal, sušení kalu, spalování kalu

ABSTRACT

The first part of this diploma thesis targets in the formation of summary of methods of sewage sludge thermal treatment. Sludge is dangerous material rising from water treatment. Original water pollution is concentrated in sludge. Spectrum of the different methods of sludge disposal is very vast, thermal methods belong to the most advanced ones. Nowadays, legislative rules and regulations make more restrictive, hence sludge disposal is problematic because of economic and ecological view of point.

The second part of this diploma thesis is dealt with perspective sludge management at the Central Waste Water Treatment Plant Prague concerning sludge drying and consequent sludge incineration.

Key words:

waste water treatment plant, sewage sludge, sludge drying, sludge incineration

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

ROSENDORFOVÁ, L. *Metody termického zneškodnění čistírenských kalů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně za pomoci literatury, kterou uvádím v seznamu.

.....

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala za cenné rady vedoucí mé diplomové práce, Ing. Lucii Houdkové, všem vyučujícím a konzultantům a v neposlední řadě také mým rodičům za podporu během studia.

OBSAH

1	Úvod.....	7
2	Produkce kalu z čištění odpadních vod.....	8
2.1	Legislativní stav	8
2.2	Čistírny odpadních vod	8
2.2.1	Skladba čistírny odpadních vod	9
2.3	Úprava čistírenských kalů	11
2.3.1	Zahušťování kalu	11
2.3.2	Stabilizace kalu	12
2.3.3	Odvodňování kalu	13
2.3.4	Hygienizace kalu.....	15
3	Současné způsoby nakládání s kalem	16
3.1	Kompostování a využití kalů v zemědělství.....	16
3.2	Skládkování kalů.....	17
3.3	Termické způsoby nakládání s kalem	17
3.3.1	Oxidační procesy	17
3.3.2	Redukční procesy	18
3.3.3	Spalování kalů v elektrárnách.....	18
3.3.4	Spalování kalů v cementářských pecích.....	18
3.3.5	Spalování kalů ve spalovnách odpadů.....	19
4	Sušení kalu	20
4.1	Teorie sušení	20
4.2	Konvekční (přímé) sušení	21
4.2.1	Bubnová sušárna	21
4.2.2	Pásová sušárna	22
4.2.3	Šneková sušárna	23
4.2.4	Fluidní sušárna	24
4.3	Kontaktní (nepřímé) sušení.....	25
4.3.1	Disková sušárna	25
4.3.2	Tenkovrstvá sušárna.....	25
4.4	Sálavé sušení	26
4.4.1	Solární sušárna.....	26
5	Spalování	27
5.1	Teorie spalování.....	27
5.1.1	Adiabatická spalná teplota	28

5.1.2	Teoretická spalná teplota	28
5.1.3	Praktická spalná teplota	28
5.1.4	Spalné teplo a výhřevnost.....	29
5.1.5	Ztráta žíháním.....	29
5.2	Spalovny	29
5.2.1	Roštová spalovna	30
5.2.2	Etážová spalovna.....	31
5.2.3	Rotační bubnová spalovna	32
5.2.4	Fluidní spalovna.....	33
6	Bilance sušení a spalování čistírenského kalu	35
6.1	Spalování kalu	35
6.1.1	Spalovací vzduch.....	35
6.1.2	Výpočet spalného tepla z elementárního složení látky	36
6.1.3	Stanovení spalného tepla a výhřevnosti	37
6.1.4	Hmotnostní bilance složek vzniklých spalin	38
6.1.5	Tepelná bilance.....	40
6.2	Spalování zemního plynu.....	40
6.3	Sušení vzduchem.....	42
6.4	Sušení pomocí termooleje	44
6.5	Kotel na odpadní teplo	46
6.6	Parní turbína	49
7	Výsledky	50
7.1	Varianty procesů	50
7.2	Bilance spalování kalu	50
7.3	Bilance sušení vzduchem	52
7.4	Bilance sušení pomocí termooleje	52
7.5	Bilance spalování zemního plynu.....	53
7.6	Ekonomické srovnání jednotlivých variant	54
8	Závěr.....	55
9	Seznam použitých zdrojů	56
10	Seznam použitých zkratk.....	60
11	Seznam použitých symbolů.....	61
12	Seznam obrázků.....	68
13	Seznam tabulek.....	69
14	Seznam příloh	70

1 Úvod

Ochrana vod patří mezi nejdůležitější zásady v oblasti životního prostředí. Největší nebezpečí pro hydrosféru představuje vypouštění znečištěných odpadních vod, jejichž vzniku se dosud nelze vyhnout. Nevyhovující kvalita vody je proto častou příčinou vyhynutí mnoha citlivých biologických druhů, onemocnění nebezpečnými nemocemi, ale také devastací globální biosféry Země. Aby bylo možné dokonale čistit povrchovou vodu, která se po použití vrací zpět do přírody, staví lidstvo čistírny odpadních vod (ČOV). Tyto složité technologické zařízení používají nejen fyzikální a chemické, ale také biologické procesy. Díky neustálému zpřísnování legislativy se zvyšují požadavky na kvalitu vody, proto roste počet nově vznikajících ČOV, které mají za úkol minimalizovat negativní vlivy odpadních vod.

Kaly z čistíren odpadních vod jsou pokládány za rizikový materiál, který při nevhodném zpracování či neuvážené aplikaci může vážně znečistit životní prostředí. Kaly, vznikající při čištění odpadních vod, představují méně než 2 % z celkového množství vod přivedených na čistírnu. Je však v nich obsaženo téměř 80 % původního znečištění.

Skládkování kalů se jeví do budoucna jako neudržitelné a naprosto nevhodné. Kromě nebezpečných dopadů na životní prostředí a zdraví člověka je také významnou skutečností vzestupná tendence poplatků za uložení kalů na skládku. Jinou možností je aplikace kalů na zemědělsky využívanou půdu. Tato však nelze použít v případech, kdy kal nesplňuje legislativou stanovené limity těžkých kovů a dalších nebezpečných látek.

Spalování surového směsného kalu je považováno za efektivní možnost finálního nakládání s kaly, protože je ověřeno výbornými praktickými zkušenostmi z celé Evropy. Při spalování čistírenských kalů dochází nejen k jejich hygienizaci, ale také k redukci jejich hmotnosti a objemu. Spalování má navíc ještě další pozitivní vlastnost, kvůli které se stává preferovanou záležitostí. Čistírenské kaly mají určitý energetický obsah, který lze spalováním dále využít. Toto ekonomické hledisko je dnes nezanedbatelným faktorem při rozhodování o způsobu nakládání s kaly.

Kal určený ke spalování je nejprve nutné podrobit sušicím procesům, protože kal po odvodnění obsahuje stále značný podíl vody. Spalování takového kalu není energeticky soběstačné na rozdíl od spalování vysušených kalů.

V této práci je provedeno porovnání několika variant, které jsou založeny na spalování sušeného kalu. Výpočty jsou provedeny pro Ústřední čistírnu odpadních vod (ÚČOV) v Praze, která v současné době stojí před volbou vhodné koncepce kalového hospodářství.

2 Produkce kalu z čištění odpadních vod

2.1 Legislativní stav

Problematika nakládání s kaly podléhá legislativě z oblasti vodního hospodářství a odpadů, zákonům o vodách, ovzduší a půdě.

Nakládání s odpady se řídí zákonem č. 185/2001 Sb. [1] o odpadech. Pokud kal vyhoví požadavkům na povolený obsah nežádoucích prvků, je nejvhodnější použít recyklační technologie. Pokud kal nesplní tyto požadavky, lze jej spalovat a případně i využít jeho energii. Při posuzování vhodnosti způsobů odstranění odpadů má vždy přednost způsob, který zajistí ochranu životního prostředí a zdraví populace.

Vypouštění odpadních vod do recipientů se řídí zákonem č. 254/2001 Sb. o vodách a zákonem č. 274/2001 Sb. o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu. Čistírny odpadních vod jsou navrhovány jako stavby s technologiemi splňujícími požadavky a přísné parametry směrnic rady Evropské unie (EU) v souladu s vydaným nařízením vlády č. 61/2003 Sb., zákonem č.185/2001 Sb. a ostatní platnou legislativou ČR. Zde jsou uvedeny související směrnice:

Směrnice Rady 86/278/EEC o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z ČOV v zemědělství upravuje používání kalů tak, aby nedocházelo k poškození půdy, vegetace, zvířat a člověka. Kal může být nebezpečný, proto je zakázáno aplikovat neupravené kaly na zemědělskou půdu.

Směrnice Rady 91/271/EEC o nakládání s komunálními odpadními vodami stanovuje minimální standardy pro čištění odpadních vod. Zakazuje vypouštění kalů do povrchových vod, stanovuje nutnost čištění odpadních vod pro obce nad 2000 ekvivalentních obyvatel (EO).

Směrnice Rady 91/689/EEC o nebezpečných odpadech je součástí zákona č. 185/2001 Sb., jehož součástí je nakládání s kaly z odpadních vod.

Směrnice Rady 1999/31/EEC vyžaduje postupné omezení ukládání biologicky rozložitelných odpadů do skládek, včetně kalů z čistíren odpadních vod.

Směrnice Rady 2000/96/EEC o spalování odpadu upřesňuje podmínky spalování.

Kapitola 2 byla vypracována s použitím literatury [2], [3], [4], [5].

2.2 Čistírny odpadních vod

Odpadní vody se dělí podle jejich vzniku na splaškové, srážkové, průmyslové a zemědělské. Produkce splaškových odpadních vod závisí na spotřebě pitné vody domácnostmi, zatímco srážkové vody přitékají kanalizací na ČOV podle srážkového úhrnu v dané lokalitě a ročním období. Průmyslové a zemědělské odpadní vody jsou kapalnými odpady, které vznikají v rozmanitých odvětvích průmyslové a zemědělské činnosti.

Pro umístění ČOV jsou vždy vybírány nejnižší položené lokality sídel nebo průmyslových zón obvykle poblíž vodního toku. Tento princip zajistí samotížný odtok odpadních vod kanalizačním řádem z celé spádové oblasti.

Každá ČOV produkuje určité množství kalu podle její velikosti, zatížení a zvolené technologie čištění odpadní vody. Vyprodukované kaly se zpracovávají v kalové koncovce, která je nedílnou součástí každé technologické linky čištění odpadních

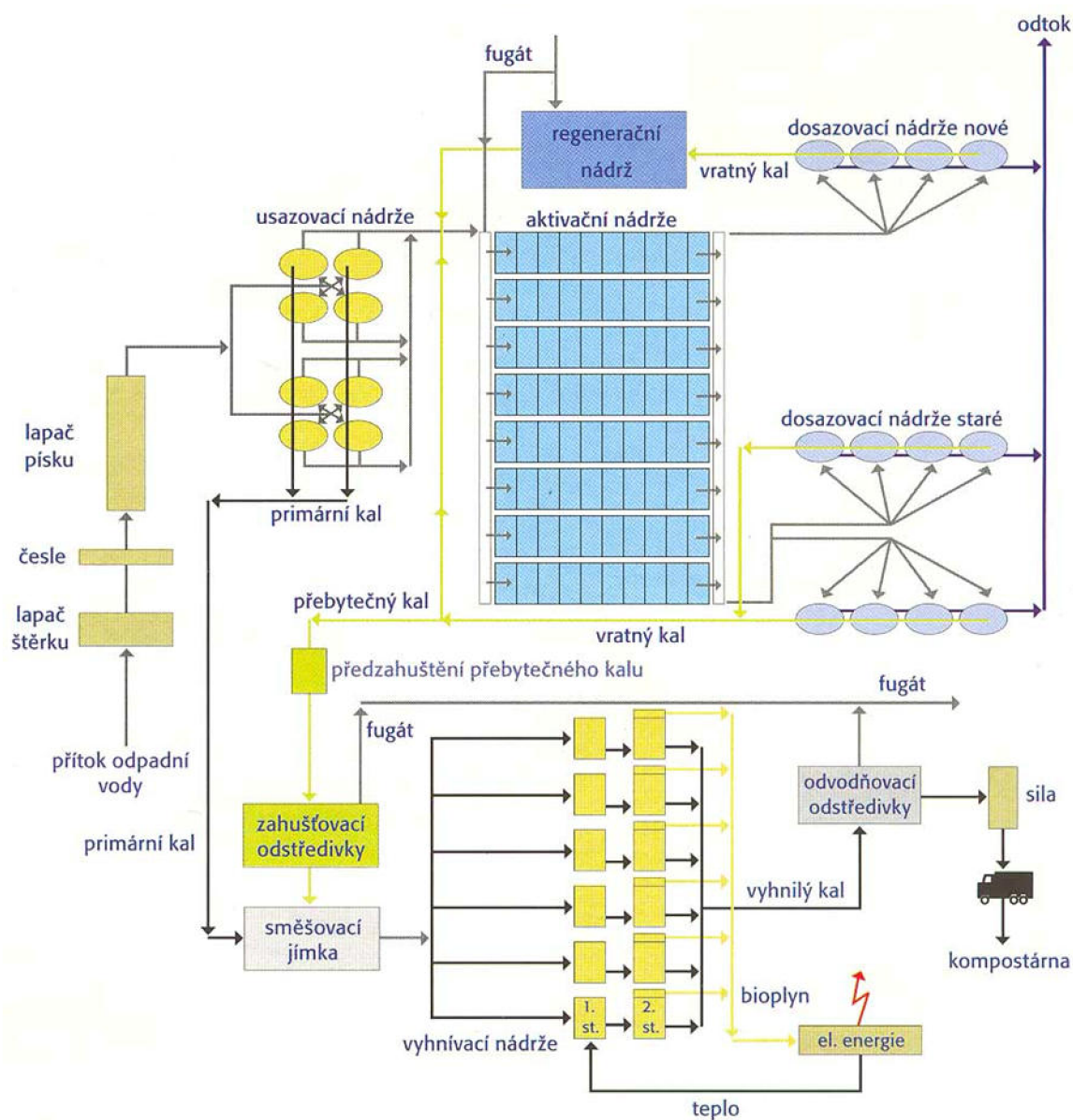
vod. Při dosažení minimálních nákladů je cílem respektovat požadavky na ochranu životního prostředí a zdravotní nezávadnost.

ČOV musí splňovat mnoho požadavků, nejdůležitějším z nich je dosažení požadované jakosti vyčištěné vody. V současnosti je dle [2] kladen důraz na:

- dosažení vysoké účinnosti mechanicko-biologického čištění, především na odstranění biogenních prvků dusíku a fosforu,
- minimalizaci negativních vlivů čistírny odpadních vod na životní prostředí,
- snížení nároků na obsluhu, vyšší stupeň automatizace a řízení,
- snížení energetické náročnosti procesu čištění,
- minimalizaci provozních nákladů.

2.2.1 Skladba čistírny odpadních vod

Příklad technologického uspořádání velké ČOV je zobrazen na obr. 1.



Obr. 1 Technologické schéma ÚČOV Praha (2003) [6]

Jako první technologické zařízení většina čistíren používá za nátokem odpadní vody hrubé česle, jemné česle a lapáky štěrku jako hrubé předčištění. Tato ochranná část ČOV odstraní nejhrubší nečistoty z přivedené odpadní vody, zabrání mechanickému poškození i zvýšenému opotřebením strojního zařízení čistírny.

Dalším zařízením mechanického předčištění jsou lapáky písku, které chrání čerpadla před abrazivním opotřebením. Pro odstranění jemnějších nečistot mohou být zařazena rotační síta či mikrosítové filtry. Lapáky olejů a tuků (lapoly) zachycují veškeré organické látky, které mají nižší hustotu než voda a nemísí se s ní. Jedná se především o ropné látky obsažené v průmyslových odpadních vodách.

Primární sedimentace zajišťuje separaci primárního kalu od surové odpadní vody na principu gravitační sedimentace v usazovacích neboli sedimentačních nádržích. Usazený primární kal je shrabovacím zařízením dopravován do prostoru sběrné kalové jámy, odkud je čerpán do objektů kalového hospodářství. Primární kal z usazovací nádrže dosahuje koncentraci sušiny 2 – 7 %.

V biologickém (sekundárním) stupni dochází k biochemickému rozkladu rozpuštěných organických látek heterotrofními mikroorganismy, které se živí znečištěním vody. V aktivačních nádržích je zabezpečen přívod kyslíku pomocí provzdušňovacího zařízení. Obsah aktivační nádrže je tvořen aktivovanou směsí, tedy směsí aktivovaného kalu a odpadní vody. Do aktivačních nádrží se přidávají koagulanty (chlorid železitý a síran hlinitý), které naruší elektrické náboje částic. Dochází tak k vytváření prvotních shluků aktivovaného kalu. Rychlé proudění vody v aktivačních nádržích podporuje tvorbu zárodků vloček. Vzniklý aktivovaný kal je řazen mezi biologické (sekundární) kaly a tvořen směsnou kulturou mikroorganismů. Převážnou většinu aktivovaného kalu zaujímají dle [7] destruenti (bakterie, houby, plísně a kvasinky), jež se podílí na biochemickém rozkladu látek v odpadní vodě. Konzumenti tvoří asi 5 % osídlení, lze vyzorovat jednobuněčné prvky jako bičíkovce, nálevníky, měňavky, mnohobuněčné vířníky, červy a háďátka. Aktivovaný kal má vločkovitou strukturu a dosahuje sušiny pouze 1 – 3 %.

Z aktivačních nádrží je aktivovaná směs dále čerpána do dosazovacích nádrží, kde dochází k oddělení vyčištěné vody a kalu. Tyto nádrže disponují ve většině případů pojezdovým mostem, který slouží ke stírání kalu u dna nádrže a kalu plovoucího na hladině. Usazený kal se rozděluje na složku označovanou jako vratný kal, který je čerpán zpět do aktivačních nádrží pro očkování, a složku přebytečného kalu. Přebytečný kal se smíchá s primárním kalem z usazovací nádrže a je čerpán jako tzv. surový směsný kal do objektů kalového hospodářství. Tam dochází k jeho zahuštění, odvodnění a aerobní či anaerobní stabilizaci.

Voda po sekundárním stupni čištění (odsazená voda z hladiny dosazovacích nádrží) již vyhovuje svou kvalitou stanoveným podmínkám a může být vypouštěna do vodoteče. V případě nutnosti lze ještě zařadit terciární stupeň čištění.

Terciární (chemický) stupeň čištění snižuje koncentrace živin, sloučenin dusíku a fosforu, aby potlačil riziko eutrofizace toků. K desinfekci čištěných vod se používá chlor. Mezi objekty terciárního stupně čištění patří pískové, mikrosítové a zemní filtry nebo vegetační kořenové čistírny. Chemický (terciární) kal vzniká jako přírůstek produkce kalu v čistírnách s instalací chemického srážení fosforu, ke kterému se používá převážně síran železitý.

Na snímku ÚČOV Praha (obr. 2) jsou znázorněny nádrže dosazovací, aktivační, usazovací a vyhnívací.



Obr. 2 Letecký snímek ÚČOV Praha [8]

2.3 Úprava čistírenských kalů

Čistírenský kal je heterogenní směs organických a anorganických látek. Organické látky představují živé i neživé buňky mikroorganismů obsahující proteiny, sacharidy a tuky, zatímco anorganické látky zahrnují převážně sloučeniny fosforu, křemíku, vápníku a železa [9]. Kromě uvedených látek obsahují kaly také nebezpečné škodliviny, jejichž výskyt podléhá pravidelné kontrole. Operace úpravy kalů z čistírny odpadních vod rozdělujeme na:

- gravitační, odstředivé, flotační a rotační bubnové zahušťování,
- chemickou (použitím vápenného mléka), termální, anaerobní či aerobní stabilizaci,
- odstředivé odvodňování kalů nebo odvodňování sítopásovými lisami a kalolisy.

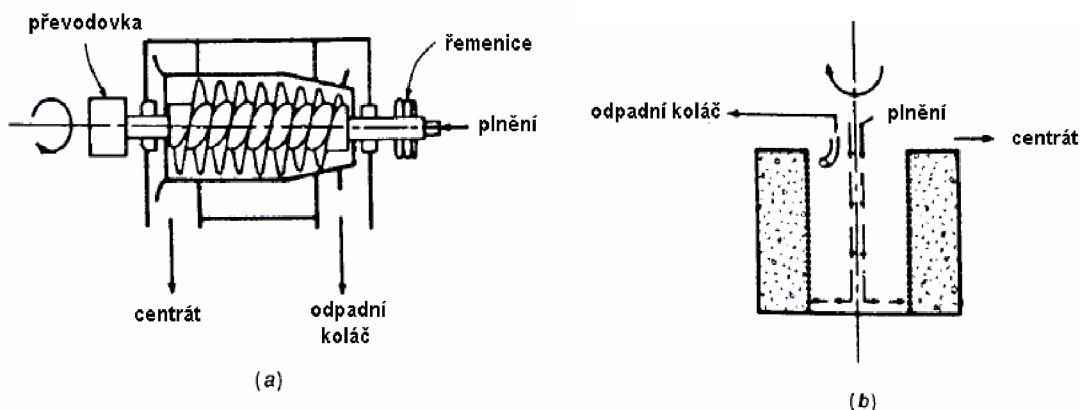
V dalších kapitolách jsou podrobněji rozebrány nejvýznamnější typy operací.

2.3.1 Zahušťování kalu

Tato operace zvyšuje obsah sušiny v kalu asi na 5 %. Zahušťování kalu je mimořádně důležité z hlediska eliminace investičních a provozních nákladů při dalším zpracování kalu. Největším přínosem je snížení objemu, které usnadňuje následné operace, zmenšuje potřebné rozměry a kapacity úpravárenských zařízení.

Gravitační zahušťování kalu je založeno na principu sedimentace v kalových prohlubních usazovacích nádržích. Průměrně dosahované hodnoty zahuštění se pohybují okolo 3,5 – 4,5 % sušiny. Konečné zahuštění je ovlivněno provozními faktory, např. časovým režimem odkalování.

Strojní zahušťování je novějším způsobem a progresivním řešením vhodným pro použití na větších ČOV. Používají se pásové a odstředivé zahušťovače. Odstředivý zahušťovač kalů je znázorněn na obr. 3.



a) odstředivka s pevným bubnem,

b) odstředivka s neperforovaným košem.

Obr. 3 Odstředivý zahušťovač kalů [10]

Strojní zahušťování může také probíhat na flotační jednotce, kde je vyločkový kal vynášen pomocí provzdušňovacího systému na hladinu. Tam je stírán a čerpán k dalšímu zpracování. Odsazená kalová voda je čerpána do aktivizačních nádrží.

2.3.2 Stabilizace kalu

Stabilizace snižuje obsah zapáchajících složek, patogenů a brání nekontrolovanému hnití. Dle platné normy ČSN 75 6401 má být kal stabilizován. Stabilizovaný kal nepáchne, nepůsobí obtíže při manipulaci, je hygienicky nezávadný, neškodí životnímu prostředí a je dobře odvodnitelný. Stabilizace může probíhat buď za anaerobních nebo aerobních podmínek. Nyní bude pojednáno o vlastnostech těchto odlišných typů stabilizace na základě literatury [11].

Anaerobní stabilizace (metanizace či také vyhnívání) je energeticky aktivní proces, kdy dochází ke vzniku bioplynu a snížení obsahu sušiny vyhnílého kalu. Bioplyn, který obsahuje metan, pohltí až 60 % kalorického obsahu původního surového směsného kalu. Spalování bioplynu v kogenerační stanici může sloužit k výrobě elektrické energie pro pokrytí potřeb provozu vlastních objektů čistírny.

Doba zdržení kalů v anaerobně stabilizačním reaktoru (obr. 4) musí být dostatečně dlouhá, aby za pomoci mikroorganismů došlo k rozkladu vyšších organických látek v kalu. Míchání reaktorů zajišťuje udržení stejnoměrné teploty a složení. Mezi negativní vlastnosti anaerobní stabilizace patří vysoké investiční náklady, protože reaktory musí být díky nízkému obsahu sušiny stavěny o velkých objemech.

Anaerobní stabilizace se provádí buď v mezofilním nebo termofilním rozsahu teplot. Při mezofilní anaerobní stabilizaci se dosahuje teploty 30 – 35 °C při době zdržení pohybující se mezi 20 a 30 dny. Nejprve probíhá stabilizace v míchané vyhřívané anaerobní nádrži, pak doznívají stabilizační procesy v uskladňovací nádrži.

Při termofilní anaerobní stabilizaci při teplotě až 60 °C dostačuje poloviční doba zdržení kalu v reaktoru oproti mezofilnímu typu stabilizace.



Obr. 4 Anaerobní stabilizační reaktory ČOV Modřice [3]

Při termofilní aerobní stabilizaci, která probíhá při minimální teplotě 50 °C, je teplo potřebné k udržení termofilních podmínek získáváno biologickým rozkladem organických látek. Termofilní organismy jsou aerobní a mají exotermní metabolismus. Pro správný provoz je nutné zajistit dostatečné zahuštění vstupního kalu, efektivní míchání a provzdušňování, tepelnou izolaci reaktoru a rekuperaci tepla. Zakrytím reaktorů lze eliminovat pachovou zátěž okolí. Vyšší náročnost řízení, problémy s pěněním, minimální vstupní sušina kalu okolo 5 %, čištění odpadních plynů, vysoká spotřeba energie pro míchání a dodávky vzduchu patří mezi negativní vlastnosti. Pozitivním rysem je výrazné snížení investičních nákladů oproti anaerobnímu způsobu stabilizace.

2.3.3 Odvodňování kalu

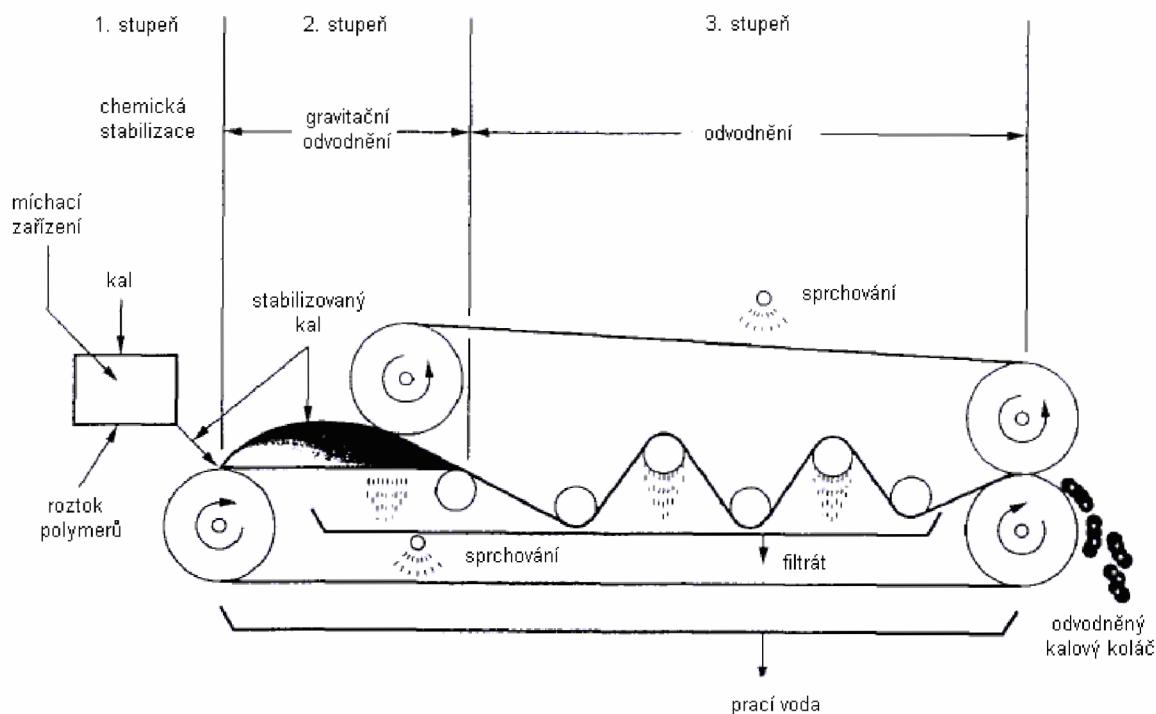
Cílem odvodňování je zvýšení obsahu sušiny v kalu. Technologicky následuje odvodňování po stabilizaci, v případě malých ČOV a přímého spalování surového kalu se aplikuje již na surový kal.

Nejjednodušším a nejstarším způsobem odvodňování je aplikace kalu na speciální vhodnou plochu s drenážním systémem ve dně – kalové pole. Kal se napustí na drenážní trubky, vrstvu štěrku a vrstvu písku. Díky současnému působení filtrace a odpaření lze dosáhnout při suchém počasí až 65 % sušiny. Nevýhodou je závislost na klimatu a povětrnostních podmínkách a omezené možnosti aplikace na asi čtyři cykly ročně.

Při odvodňování kalu strojním způsobem se dávkuje do kalu chemická srážedla, koagulanty a polymerní flokulanty, které se podílejí na vytvoření vloček. Přispívají tak významnou měrou k odvodnění, bez jejich použití by odvodnění mělo nízkou účinnost. Přesné dávkování chemikálií, obsah sušiny tuhé fáze a koncentrace nerozpuštěných látek v tekuté fázi patří mezi sledované provozní ukazatele.

Při odvodňování na odstředivce se kal dle [12] přivádí potrubím v ose bubnu, odstředěný kal se usazuje na vnitřní straně rotačního bubnu, zatímco filtrát (fugát) odtéká přes hranu bubnu zpět do procesu. Odvodněný kal je posléze dopravován šnekem rotujícím uvnitř bubnu k užšímu konci komolého kužele odstředivky, kde vypadává ven. Odstředivky jsou vyhledávány díky své výkonnosti a prostorové nenáročnosti v porovnání s ostatními odvodňovacími zařízeními.

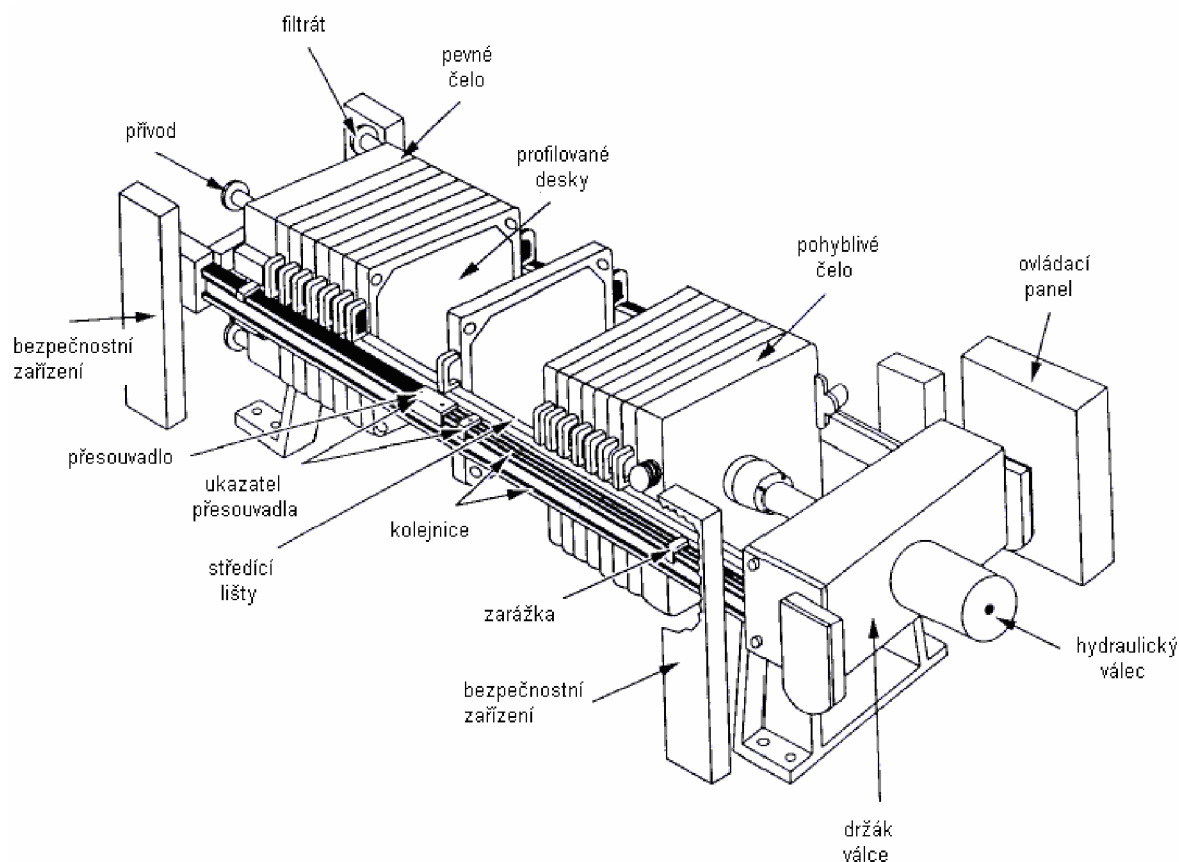
Při odvodňování pásovým filtračním lisem (obr. 5) vstupuje kal mezi dva nekonečné filtrační porézní pásy, které meandrovitě procházejí systémem lisovacích válců nejprve v homogenizační, gravitační, posléze nízkotlaké a vysokotlaké sekci. V prvních dvou sekcích působí na kal pouze jeden pás. V nízkotlaké sekci dochází ke stlačování kalu oběma pásy. Největšího tlaku je dosaženo ve vysokotlaké sekci při průchodu mezi válci malých průměrů. Postupné stlačování koláče usnadňuje uvolňování vody. Výsledný odvodněný kal bývá z pásů odstraněn škrabkou. Produkovaný filtrát se vrací zpět do čistícího procesu. Pásy se čistí buď tryskáním vody nebo ručně ovládanými kartáči. Rychlost pásů je řízena prostřednictvím frekvenčního měniče, každý pás je automaticky napínán a vystředován.



Obr. 5 Princip pásového filtračního lisu [10]

Odvodňování filtračním lisem neboli kaloliséem (obr. 6) zaručuje spolehlivý cyklický proces tlakové filtrace. Při vysokém tlaku dochází k separaci pevných látek od kapaliny. Kal je tlakem protlačován řadou filtračních pláten a pevné látky jsou akumulovány v komorách lisu. Ze zadržovaných částic vzniká filtrační koláč obsahující vysokou koncentraci sušiny. Filtrát, vytlačený přes porézní tkaninu plachetky, je recyklován zpět do procesu čištění. Velikost kalolisu bývá charakterizována počtem filtračních desek a délkou jejich hrany. Mezi nevýhody kalolisů patří omezená životnost pláten a periodičnost provozu. Mezi nesporné výhody patří dosažení vysoké koncentrace sušiny v odvodněném kalu, přizpůsobivost procesu filtrace a filtrovanému médiu při konkrétních požadavcích dané technologie. Kalolisy se

úspěšně ověřily v praxi při odvodnění kalů z úpraven vod tepláren, elektráren, z kalů komunálních i průmyslových ČOV.



Obr. 6 Kalolis s rámovými deskami s fixním objemem [10]

2.3.4 Hygienizace kalu

U čistírenského kalu musí být omezeny jeho nebezpečné vlastnosti. Za upravený kal je pokládán kal podrobený biologické, chemické nebo tepelné úpravě, při které se významně snížil obsah patogenních organismů, a tím zdravotní riziko spojené s jeho aplikací.

Kalcinace (vápnění) patří mezi jednoduché a rozšířené metody hygienizace. Spočívá v dávkování práškového páleného vápna CaO do kalu před nebo po jeho odvodnění. Při exotermní reakci páleného vápna a vody vzniká hydroxid vápenatý.

Mezi nejvýznamnější výhody patří výsledná eliminace salmonel, procentuální zvýšení sušiny a vhodnost vápněného kalu pro půdy s nižším pH. Při vápnění se dosahuje hodnoty pH 12 a teploty až $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dávkování vápna závisí vždy na konkrétním charakteru kalu.

3 Současné způsoby nakládání s kalem

Vznik kalu jako odpadu je nevyhnutelným výsledkem čištění odpadních vod. Zpracování těchto vod má odstraňovat nežádoucí složky z vody a koncentrovat je do objemově nevýznamného vedlejšího proudu, jímž je kal. Cílem úpravy kalů je zabránit nepříznivým dopadům na životní prostředí a tedy i lidské zdraví. Neupravené kaly není možné vypouštět ani ukládat, protože nečistoty v nich obsažené ohrožují ovzduší a vodstvo. Zdravotní rizika jsou spojena s koncentrací znečišťujících složek v kalu, závisí na počáteční kvalitě odpadní vody a na dosažené kvalitě vyčištěné odpadní vody. Požadavkem je ekonomicky únosné využití nebo zpracování kalů, které je také přijatelné pro životní prostředí. Zpracování kalů obvykle stojí více než polovinu celkových nákladů na čištění odpadních vod. Obsah velkého množství vody brání spalování kalů, pomocí nových technologií je třeba produkovat kal s vysokou koncentrací sušiny.

Díky neustálému trendu zpřísnování standardů pro životní prostředí bude zpracování kalů stále komplexněji řešeno. Ukládání kalů do moře bylo v Evropské unii legislativně zastaveno teprve k 31. 12. 1998 [13]. Produkci kalů nelze zabránit, vhodným výběrem technologie lze pouze zmenšit jejich množství. Požadavky na vyšší kvalitu vypouštěné vody budou také nadále zvyšovat množství produkovaných kalů. Jedinými možnostmi jsou recyklace a destrukční metody. Recyklací je míněno použití místo organického hnojiva nebo rekultivace pro zlepšení kvality půdy. O některých možných variantách zneškodnění čistírenských kalů bude podrobněji pojednáno v následujících kapitolách.

3.1 Kompostování a využití kalů v zemědělství

Aplikaci kalů do zemědělské půdy omezují limity nebezpečných látek, protože zvláště v zemědělství musí hygienické riziko podléhat přísné kontrole. Upravené kaly jsou svým obsahem živin podobné organickým hnojivům a jsou přínosem pro výživu rostlin. Před použitím v zemědělství vždy musí být kal stabilizován a prověřen z hlediska nezávadnosti. Při aplikaci kalů v zemědělství je vždy nutné zabránit nepříznivým dopadům na životní prostředí a lidské zdraví [14].

Kompostování, jak dokazuje obr. 7, zaujímá v současnosti v České republice nadpoloviční zastoupení mezi ostatními variantami nakládání s kaly.



Obr. 7 Zneškodnění čistírenských kalů v ČR v roce 2006 [15]

Při kompostování kalů dochází k jejich aerobní biologické stabilizaci. Termofilní bakterie částečně rozloží původní organické látky z kalu na stabilní humusové látky, které jsou potřebné pro úrodnost půdy. Zemědělským využitím kompostů lze snížit deficit organického hnojení a vyrovnat bilanci organických látek v půdě. Při jeho použití se dosahuje zvýšení úrodnosti půdy.

Při tvorbě kompostu je kal kvůli zvýšení porozity míchán s plnivem (sláma, kůra dřevin), které je nutné pro efektivní provzdušňování a redukci vlhkosti. Při výrobě kompostů je třeba zajistit na 1 t sušiny nezávadných čistírenských kalů alespoň 3,4 t sušiny dalších čistých bioodpadů [16]. V kompostárně je kal promíchán s plnivem a uspořádán do tvaru slohu.

Proces kompostování probíhá při obsahu vody v kompostovaném materiálu kolem 60 %, její množství v průběhu procesu klesá. Díky mikrobiálním procesům se uvolňuje teplo, teplota materiálu dosahuje až 60 °C. Setrváním na této vysoké teplotě po určitou dobu dochází k usmrcení patogenů, proto je nutné pravidelně kompost promíchávat. Doba vytvoření kompostu čítá 15 až 45 dnů s následným stabilizačním skladováním 30 dnů. Pokud jsou splněny hygienické limity pro obsahy nežádoucích látek (tab. 1), lze použít i kaly z průmyslových ČOV.

Prvek	Pb	Cd	Cr	Hg	Ni	Zn	Cu	As	Mo
Limitní obsah [mg/kg]	500	13	1000	10	200	3000	1200	50	25

Tab. 1 Limitní množství těžkých kovů pro použití do kompostů [17]

3.2 Skládkování kalů

Skládkování kalů bývalo v minulosti hlavním způsobem likvidace. V posledních letech je obecně považováno za neudržitelné, a proto se od této činnosti ustupuje. Skládkování, jako zdánlivě nejjednodušší varianta, ovlivňuje životní prostředí takovou měrou, že ve vodě rozpuštěné nebezpečné látky ohrožují nejen jakost podzemních zdrojů pitné vody, ale životního prostředí vůbec. Vyluhováním a zkoncentrováním nebezpečných látek je následně kontaminována půda. Navzdory všem negativním dopadům skládek na životní prostředí zůstává i nadále trvalé uložení kalů na skládkách jedním z finálních způsobů nakládání s kaly.

3.3 Termické způsoby nakládání s kalem

Technologie, při nichž působí na odpadní látku teplota nad mezí chemické stability látky, lze označit jako termické způsoby. Původně nebezpečné látky jsou přeměněny na neškodné produkty za vzniku vedlejších produktů, např. popela, strusky nebo plynných látek. Široké rozmezí teplot se dle [18] pohybuje od 300 °C do 1500 °C. Podle stechiometrického obsahu kyslíku během termického procesu jsou rozděleny procesy na oxidační a redukční.

3.3.1 Oxidační procesy

Při oxidačních procesech je obsah kyslíku v reakčním prostoru stechiometrický nebo i nadstechiometrický vzhledem k obsahu hořlaviny v materiálu. Příkladem tohoto typu procesu je spalování, nejdůslednější a hygienicky nejúčinnější způsob odstranění odpadů. Při řízeném exotermickém sloučení hořlaviny s kyslíkem

dochází k redukci původního objemu a zničení nebezpečných látek. Tento technologicky jednoduchý proces umožňuje pouze produkci tepla.

3.3.2 Redukční procesy

Při redukčních procesech zplyňování a pyrolýzy je obsah kyslíku v reakčním prostoru podstechiometrický nebo zcela zanedbatelný.

Při pyrolýze dochází k termickému rozkladu organických látek bez přístupu kyslíku. Vzniklé produkty tvoří těkavé plynné produkty a tuhý zbytek (koks).

Zplyňováním lze využít energii obsaženou v kalu. V současnosti se tento způsob jeví jako efektivní a spolehlivý, protože zplyňovat lze dle [19] v podstatě libovolnou hmotu organického původu. Při teplotách nad 800 °C nedochází díky podstechiometrickému množství vzduchu k oxidaci hořlavých prvků v sušině. Místo toho se nedokonalým hořením materiálu přemění uhlíkaté látky na hořlavou směs plynů (syntézní plyn, energoplyn), mezi kterými převažuje vodík, oxid uhelnatý a metan. Účelem zplyňování je transformace maximálního podílu energie paliva do maximálního energetického obsahu plynu.

Kvůli obsahu nežádoucích látek – prachu, sloučenin dusíku, benzenu, sirovodíku, dehtové a vodní mlhy, halogenů chloru a fluoru, je nutné energoplyn před dalším využitím vyčistit. Obsah nečistot způsobuje provozní problémy jednotek. Zanášení přívodního potrubí a zadehtování pracovních ploch motorů a turbín může dle [20] způsobit vážné poruchy zařízení vedoucí k odstavení jednotek. Vyčištěný energoplyn lze následně spalovat v hořácích nebo účinněji v plynové turbíně pohánějící generátor pro výrobu elektrické energie.

Při zplyňování nejprve dochází k oxidaci uhlovodíků a vodní páry z paliva, potom k jejich následné redukci na hořlavé plyny, destilační produkty a minerální zbytek. V porovnání se spalováním je zplyňování výhodnějším procesem, protože při něm vzniká méně nežádoucích emisí. Tento příznivý efekt je dosažen díky lepší regulaci následného spalovacího procesu, protože dochází ke spalování plynného paliva.

3.3.3 Spalování kalů v elektrárnách

Podmínky pro současné spalování odpadů jsou upřesněny zákonem č. 354/2002 Sb. Ve státech, kde jsou kaly spalovány, bývá jejich množství asi 5 % váhového množství uhlí, větší podíl se nedoporučuje s ohledem na možnost snížení teploty hoření. Nároky na zavedení technologie současného spalování kalů vyžadují doplnění stávajícího technologického celku o zařízení pro příjem kalu, jeho skladování a dávkování do kotle.

V Německu je v provozu dle [21] asi 25 uhelných elektráren, které spalují spolu s uhlím čistírenské kaly. V České republice jsou sice elektrárny vybaveny účinným čištěním emisí, přesto tento způsob nakládání s kaly není zatím považován za perspektivní.

3.3.4 Spalování kalů v cementářských pecích

V cementářských pecích je úspěšně realizováno spalování kalů z městských ČOV. Tato bezodpadová metoda konečného zpracování kalu byla vyvinuta v Japonsku a z hlediska provozovatele je ryze ziskovou záležitostí. Primárními zdroji energie pro provoz cementáren jsou fosilní paliva, která lze částečně nahradit odpadem definovaného složení. Cementářský průmysl vyžaduje dle [21] min. 90 % sušiny v kalu a hodnotu jeho výhřevnosti asi 10 000 kJ/kg.

Vysušený kal bývá dávkován do nejteplejší zóny rotační pece, kde dochází vlivem teploty nad 1000 °C ke spolehlivému spálení organické hmoty a úplnému odstranění všech toxických organických látek. Kvůli zachování dobrých vlastností cementu lze nahradit sušeným kalem pouze 5 % množství uhlí. Anorganický zbytek v omezeném poměru k cementářské hmotě výrobek nepříznivě neovlivní, mimo jiné z důvodu podobného složení cementářské suroviny a popelu vzniklého spálením kalů. Slínek je po vychlazení namlet spolu se sádrovcem do výsledného produktu, cementu. Limitujícím faktorem použití kalů jako paliva je obsah nebezpečných látek. Těžké kovy jsou však pevně vázány do cementářského slínku a nemohou z něj být vyluhovány.

3.3.5 Spalování kalů ve spalovnách odpadů

Úkolem prvotních spaloven bylo zničení choroboplodných zárodků a redukce množství odpadů. Postupem času začaly spalovny využívat uvolněnou tepelnou energii spalin v kotlích, jejichž účinnost zdokonalením technologií dosáhla až dnešních 80 % (v případě kogenerace).

Ve spalovnách odpadů jsou čistírenské kaly spalovány spolu s odpadem, buď jako odvodněné kaly s obsahem sušiny do 25 %, nebo jako vysušené kaly s minimálním obsahem sušiny 75 %. Spalování odvodněného kalu je energeticky náročnější, přináší pokles výkonu kotle, protože voda obsažená v kalu se musí nejprve odpařit. Spalovny musí být vybaveny účinným systémem čištění spalin, který umožní také spalování čistírenského kalu.

4 Sušení kalu

Energetický obsah čistírenských kalů spočívá v energii přítomných organických látek, které jsou schopny oxidace. Za nejdůležitější energetický parametr každého paliva je považována výhřevnost. Kaly jsou velmi řídké suspenze, jejich výhřevnost závisí na dosaženém stupni zahuštění, odvodnění a vysušení. Významným parametrem pro spalovací proces je tedy obsah sušiny v kalu. Odvodněné kaly obsahují vysoký podíl vody 60 až 80 % [9]. Kvůli jejich nízké výhřevnosti kalů je nelze samostatně spalovat. Proto je výhodné všem technologiím termického zpracování kalů předřadit proces jejich sušení. Odpařováním vody dojde ke snížení jejího obsahu, tedy i redukci hmotnosti. Další manipulace a nároky na dopravu pak budou ekonomicky únosnější. Vysušený kal se stává energetickou surovinou, ze které lze spalováním získat tepelnou energii.

4.1 Teorie sušení

Vlhkost může být uložena v tělese na povrchu, může být také vnitřní vlhkostí v pórech, kapilárách nebo může být koloidní jako součást vlastního materiálu. Procesem sušení lze vyjádřit transport vlhkosti k povrchu a její následné odpaření vlivem tepelné energie. Při sušení je v rovnováze vlhkost sušícího média a vlhkost materiálu, proto je míra sušení limitována vlhkostí sušícího média.

Sušení patří mezi energeticky náročné procesy, snížit ekonomické náklady na sušení kalu lze pouze jeho odvodněním. Účinnost sušícího procesu závisí na teplotě sušení, ploše přenosu tepla a velikosti vrstvy sušeného kalu. Produktem sušení je sušený granulát o obsahu 70 až 95 % sušiny, který je biologicky stabilní, bezproblémově skladovatelný a pachově neutrální. Díky vysokému obsahu sušiny je vhodný zejména pro spalování ve všech spalovacích zařízeních.

Při odpaření vody a dostatečné době prodlení na teplotách sušení nad 100 °C je vítaným vedlejším účinkem sterilizace kalu. Dochází k usmrcení enterobakterií, salmonel, červů i dalších parazitů. U nízkoteplotního sušení při 40 °C na pásové sušičce k likvidaci patogenů dle [21] nedochází, výhodou je však nižší energetická náročnost. Usušený kal je odolnější proti opětovné kontaminaci, protože množení bakterií je podmíněno vlhkostí. Při transportu a manipulaci je tedy nutné zamezit opakovanému proniknutí vlhkosti.

Při obsahu sušiny 85 % je skladovatelnost suchého kalu až 3 roky bez přídavku stabilizátorů. Při nižším obsahu lze stabilizovat kal přidáním 1 % močoviny. Dle [22] je kal vysušený na 70 % problematický z hygienického hlediska kvůli možnému růstu hub, které spolu s prachovým podílem vysušeného kalu mohou způsobit alergie. Problém prašnosti usušeného kalu lze vyřešit peletizací. Peletizovaný kal obsahuje méně než 1 % prachových částic. Peletizace přináší řadu výhod, kromě snížení prašnosti také homogenizaci, přesnost dávkování, bezproblémovost při přepravě a manipulaci. Pro čistírenské kaly se obvykle volí velikost pelet nad 5 mm. Kaly vhodné pro peletizaci musí dosahovat sušiny min. 60 % [23].

Při nedostatečném vysušení se může objevit nebezpečí samovznícení kalů. Při dosažené sušině okolo 65 % někdy samovznícení také nastává v místech s vyšší vlhkostí jako důsledek autooxidace kalu. Přítomnost prachového podílu kalu se významně podílí na nebezpečí výbuchu kalu. Proto se usušený kal skladuje v inertizované atmosféře při snížené koncentraci kyslíku pod 5 %.

Mezi odpadní produkty sušení patří v procesu vzniklé odpadní plyny a vodní páry, které jsou odváděny do ovzduší přes biofiltry, a kondenzát jako produkt ochlazení sušícího média. Technologický celek sušárny může taktéž pracovat plně automaticky při zařazení řídicí a regulační techniky. Je vhodné jej doplnit zařízením pro manipulaci s vysušeným kalem a skladovacími silami.

Proces sušení může být realizován konvekčním (přímým), kontaktním (nepřímým) nebo sálavým způsobem, o nichž bude pojednáno v následujících kapitolách.

4.2 Konvekční (přímé) sušení

Sušící médium (vzduch, spaliny, přehřátá vodní pára, inertní plyn) je přiváděno do přímého kontaktu s čistírenským kalem a odnímá mu vodu. Výstupní odtahové plyny nasycené vodní párou podléhají čištění.

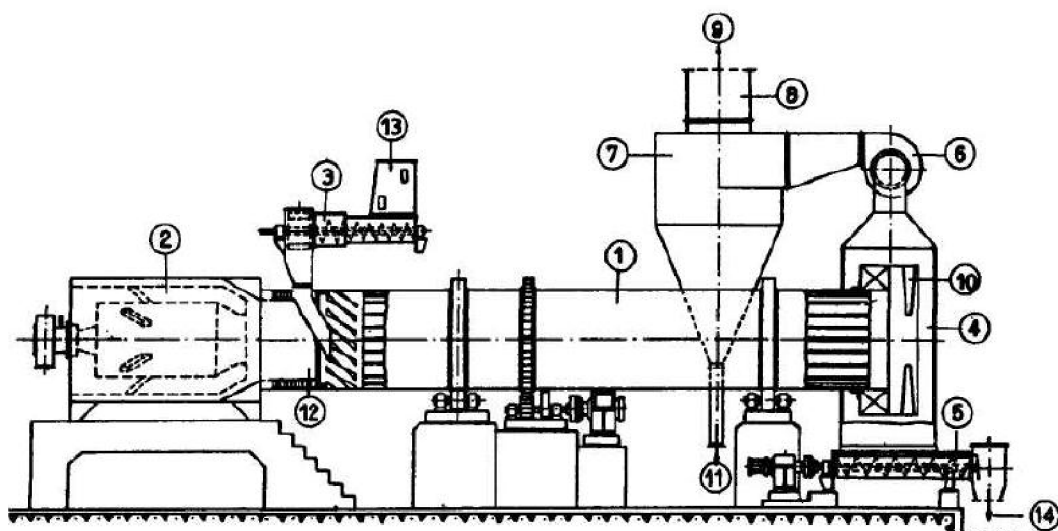
Mezi běžně používané konvekční sušící zařízení patří bubnové sušárny, pásové sušárny, šnekové sušárny, fluidní sušárny a solární sušárny (kombinace konvekčního a sálavého principu).

4.2.1 Bubnová sušárna

Mezi hlavní výhody bubnových sušáren patří jejich použitelnost pro sušení a granulaci většiny sypkých materiálů včetně komunálních a průmyslových kalů. Tento nejrozšířenější způsob sušárny kalů je ověřen mnohaletými provozními zkušenostmi. Dostatečná tepelná účinnost je zaručena rovnoměrným průchodem granulátu bubnem se stálou rychlostí sušení. Doporučená doba průchodu sušeného materiálu bývá delší než doba nutná k jeho vysušení. Nevýhodou bubnové sušárny navzdory dokonalému přizpůsobení vnitřní vestavby je nižší intenzita sušení v porovnání např. s fluidní sušárnou.

Odvodněný kal se dávkuje ze zásobníku šnekovým podavačem, který současně rozmělnuje větší částice. Aby se zamezilo připékání kalů na stěny bubnu, je nezbytné smísit mokré kal s vratným vysušeným materiálem (prach z odlučovače prachu, nedosušený granulát) na sušinu cca 60 %. Nalepením částic kalu na předsušený materiál se vytváří základ granulátu. Vzniklá směs je sušena horkými spalinami ve speciálním rotačním bubnu na sušinu až 90 % [21]. Při otáčení bubnu je sušený kal neustále promícháván a přesouván vestavěnými rameny.

Princip bubnové sušárny je znázorněn na obr. 8. Vysušený kal je odstraňován šnekovým vynašečem. Při homogenizaci dochází ke třídění, odsátí prachu a nedosušeného granulátu. Z horkých zplodin je nejprve odloučen prach, následně při průchodu výměníkem zplodiny odevzdají teplo, které se využije k přehřevu kalu. Dále mohou posloužit jako spalovací vzduch ve spalovacím zařízení. Prach z třídění i zplodin se vrací zpět jako surovina do míchacího zařízení. Vytříděný granulát je homogenizovaný, bezprašný, hygienizovaný a tvarově stabilní. Jeho použitím a manipulací nedochází k pachovému zatížení okolí. Po ochlazení je uložen do sila granulátu a připraven pro další využití. Emise do ovzduší jsou díky zařazení odlučovače prachu (multicyklonu) minimální.

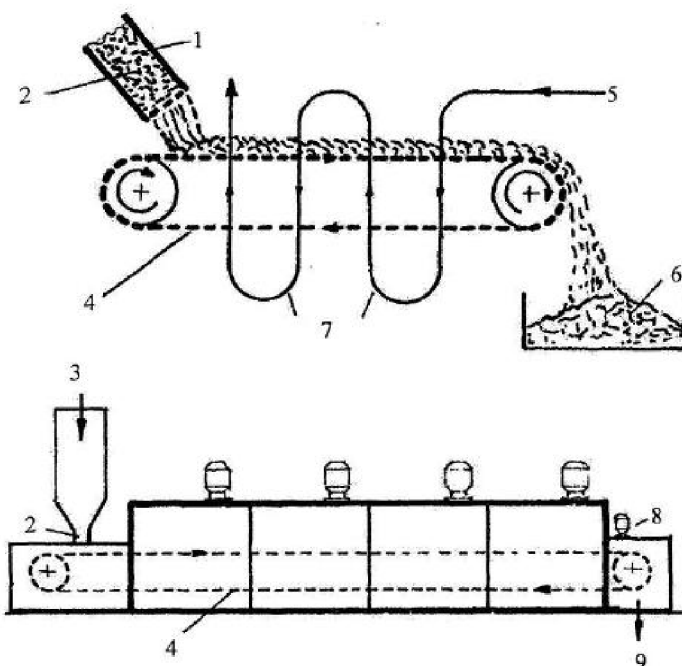


1. Buben sušárny. 2. Ohřívák vzduchu. 3. Dopravník kalu. 4. Zásobník sušeného kalu. 5. Šnekový vynašeč suchého kalu. 6. Ventilátor. 7. Odlučovač prachu. 8. Odvod vzniklé vodní páry. 9. Odtah. 10. Hradící zařízení. 11. Prachové částice. 12. Napojení zdroje tepla k bubnu. 13. Zásobník odvodněného kalu. 14. Usušený granulát.

Obr. 8 Princip bubnové sušárny [21]

4.2.2 Pásová sušárna

Pásová sušárna (obr. 9) se v praxi osvědčila pro širokou škálu použití, od kalů z komunálních i průmyslových čistíren odpadních vod až po biomasu. Vytváří optimální podmínky pro využití odpadního tepla, spalin, páry nebo horkého vzduchu jako teplotního média.



1. Odvodněný kal. 2. Dávkování kalu. 3. Zásobník odvodněného kalu. 4. Perforovaný sušící pás. 5. Sušící médium. 6. Zásobník vysušeného kalu. 7. Proud plynu. 8. Pohon pásu. 9. Vysušený granulát.

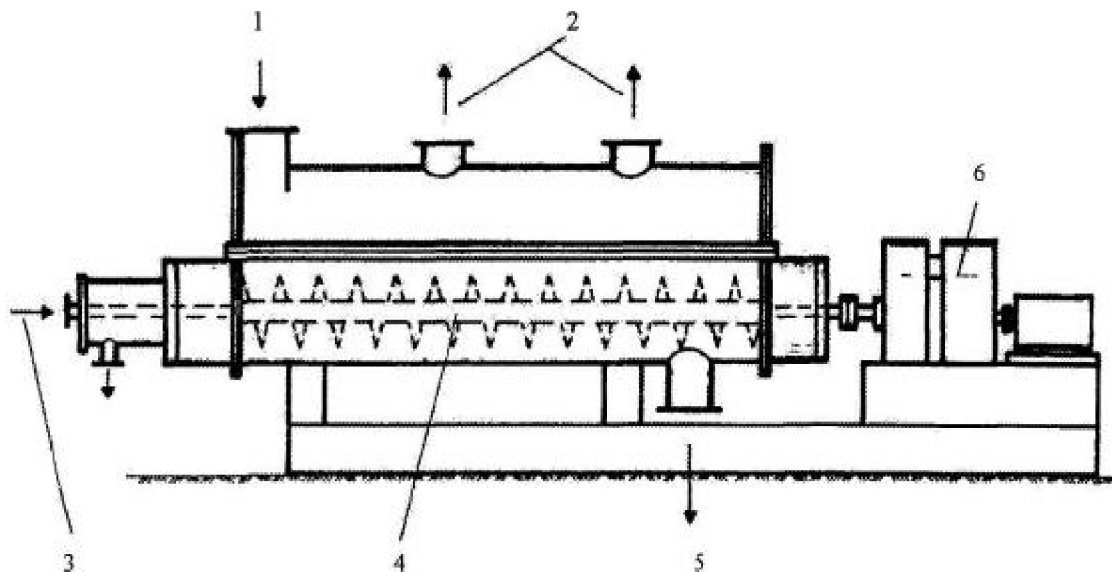
Obr. 9 Princip pásové sušárny [21]

V závislosti na zdroji tepla a teplotě sušícího média se používají pásy textilní (tkané i netkané), kovové (perforované, tkané z ocelových vláken) a pásy na bázi plastických hmot. Vrstva odvodněného kalu od 4 do 15 cm je skrze horizontální pás provzdušňována proudem teplotního média o teplotě asi 150 °C [24]. Sušící vzduch při svém proudění absorbuje vlhkost ze sušeného materiálu. Po průchodu sušící zónou dosahuje výsledný produkt přes 90 % sušiny a musí být před konečným zpracováním ochlazen. Díky možnosti násobného využití teplotního média lze vybudovat vícepásové systémy, kdy jsou pásy umístěny v patrech nad sebou. Tento typ sušárny kromě nižších investičních nákladů i nákladů na údržbu šetří také zastavěnou plochu.

Vysoušený kal není nijak mechanicky namáhán, proto je podíl prachových částic malý. K eliminaci případných nežádoucích pachů vzniklých při sušení lze zařadit biofiltry. Veškerým nežádoucím prachovým a pachovým emisím do okolního prostředí lze předejít při podtlakovém provozu zařízení. Zvláštním typem jsou sušárny pracující při teplotě sušícího média kolem 40 °C. Využívá se přirozené vlastnosti suchého vzduchu pohlcovat vlhkost, proto je samotnému sušícímu vzduchu před procesem sušení odňata vlhkost.

4.2.3 Šneková sušárna

Další variantou technického řešení sušení kalů je šneková sušárna (obr. 10). Používá nejen kontaktní, ale také konvekční typ sušení čistírenských kalů.



1. Vstup kalu. 2. Odtah vzniklé vodní páry. 3. Sušící médium (pára). 4. Vyhřívaný šnek. 5. Výstup kalu. 6. Pohon šneku.

Obr. 10 Princip šnekové sušárny [21]

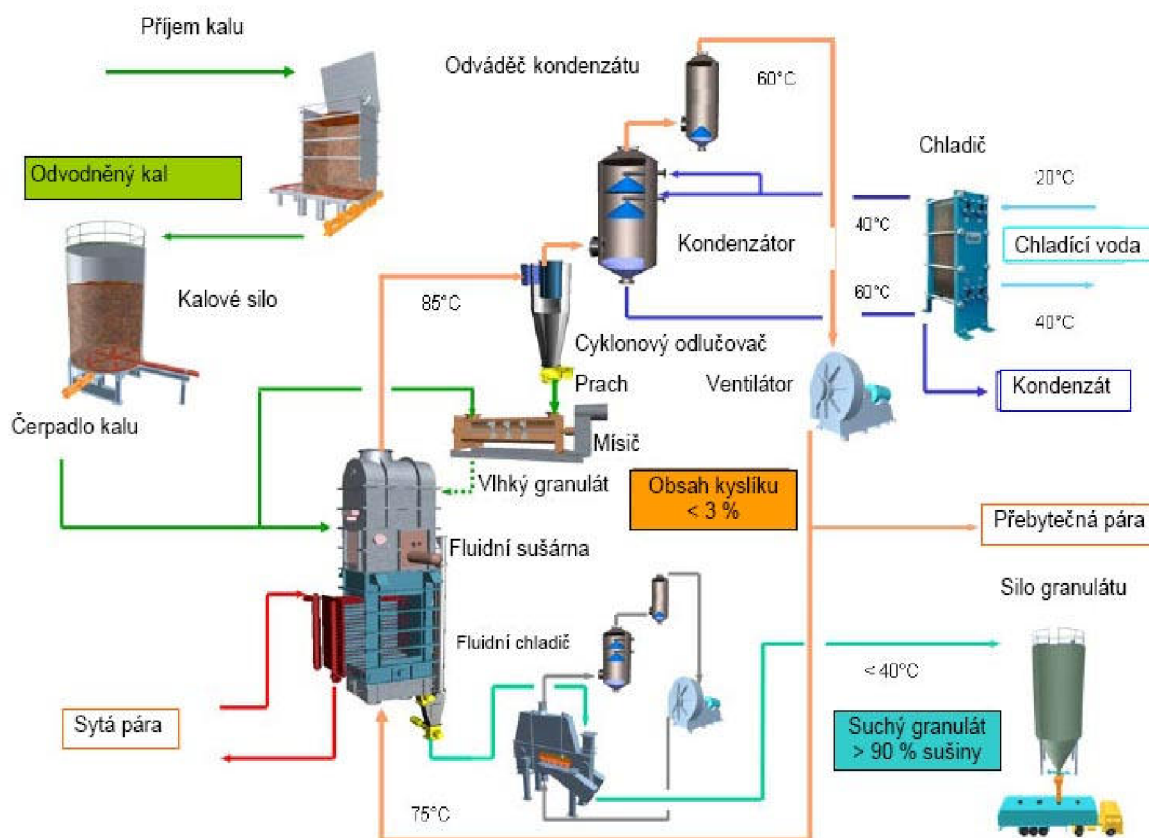
Kontaktní typ využívá pro vyhřívání šnekový dopravník za teplotního média olej, který je ohřátý na 250 °C. Při kontaktu média, vyhřívání ploch a sušeného kalu dochází k odpařování vody z kalu. Při průchodu kalu šnekovým žlabem je zajištěno jeho neustálé kypření a přesypávání, které přispívá k optimálnímu odpaření vody. Šnekové žlaby bývají obvykle umístěny nad sebou ve čtyřech rovinách.

Konvekční typ je založen na podobné konstrukci. Rozdíl spočívá v otevřenosti žlabů umístěných v jednom bloku. Šnekové dopravníky zajišťují postupný chod sušeného kalu sušárnou. Jako zdroj tepla bývají využity plynové hořáky. Vzniklé horké spaliny

prochází sušící komorou. Mezi vhodné zařízení patří biofiltry eliminující nepříznivé pachy a mechanismus odvodu vzniklé vodní páry.

4.2.4 Fluidní sušárna

Princípem sušícího procesu (obr. 11) je udržení částic kalu ve vznosu v zestupným proudem horkých plynů nebo vzduchu. Při vyrovnání tíhové síly materiálu a v zestupné síly proudícího média dojde k nadnášení materiálu. Při dalším růstu rychlosti proudícího média nastává fluidizace, kdy se materiál v pohybu vznáší. Sušení se provádí intenzivním přenosem tepla ve fluidní vrstvě. Snížení hustoty vrstvy a pokles vzájemného tření umožňuje intenzivní promíchávání.



Obr. 11 Princíp fluidního sušení [25]

Fluidní lože je prohříváno horkým médiem proudícím systémem trubic. Ochlazené médium se vrací zpět k tepelnému zdroji, aby se znovu ohřálo na potřebnou teplotu. Protože je ze spodní strany fluidní lože profukováno, udržuje vysoušený kal ve vznosu a odnímá mu vodu. Mechanicky odvodněný kal je při dávkování rozmělněn na malé částičky, které jsou vmíchány do fluidizovaného lože suchého granulátu. Cirkulační plyn obsahuje plyny z vysušeného kalu, kontrovaný obsah kyslíku nepřevyšuje 3 %. Prostor fluidní sušárny je inertizován dusíkem, aby se eliminovalo riziko požáru či výbuchu. Prachové částice jsou po průchodu cyklonem vráceny do fluidního lože. Suchý granulát dosahuje na výstupu z fluidní sušárny asi 90 % sušiny, shromažďuje se v silu a je odvážen k dalšímu použití např. do spalovací pece. Vysušený kal je bezprašný produkt, který je biologicky stabilní. Provoz zařízení může být projektován jako bezobslužný, navíc díky plynotěsnému provedení nezatěžuje životní prostředí nežádoucími pachy.

4.3 Kontaktní (nepřímé) sušení

Teplota je při tomto typu sušení přenášena do sušeného kalu prostřednictvím vyhříváných ploch. Topné médium je vedeno uzavřeným topným okruhem a nepřichází do styku s kalem. Protože vodní páry nejsou smíchány s topným médiem, probíhá jejich kondenzace v rekuperačním výměníku. Na tomto principu kontaktního sušení kalů pracují diskové a tenkovrstvé sušárny.

4.3.1 Disková sušárna

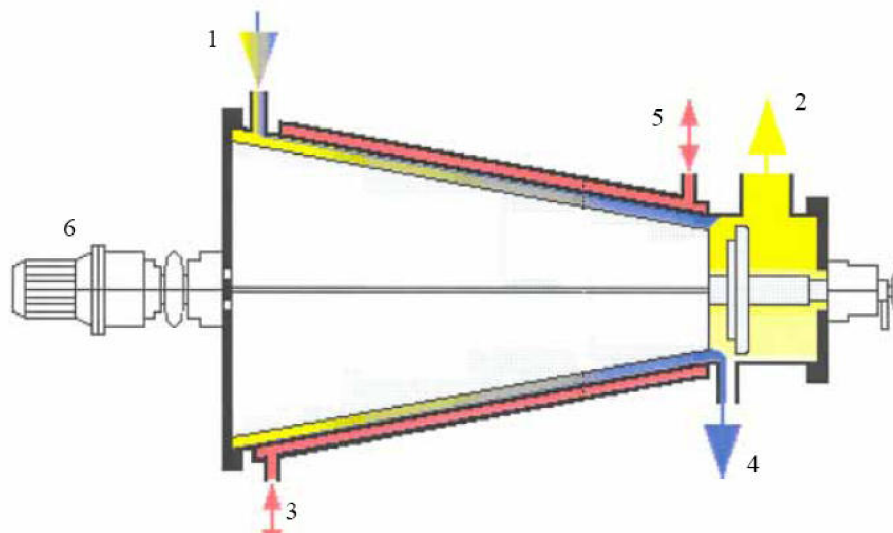
Stator diskové sušárny (obr. 12) je tvořen vnitřním vyhříváním žebrovaným válcovým tělesem. Vyhřívání rotor sušárny tvoří disky upevněné na duté ose, které se otáčejí a tak kypří, provzdušňují a transportují sušený kal sušárnou. Jako teplotonosné médium je zde použit termální olej. Díky důmyslnému systému lopatek je zamezeno napékání kalu na vyhříváných plochách. Tento nežádoucí efekt lze omezit částečným vrácením již vysušeného kalu. Vysoká účinnost sušení vychází z neustálého kontaktu vyhříváných ploch a sušeného kalu. Volitelný konečný obsah sušiny a produkt (pasta, prach, granulát, brikety) předurčuje široké použití tohoto typu sušárny. Kal dosahuje sušiny 85 – 95 %, systémem dopravníků je za současného ochlazování přepravován do kontejnerů.



Obr. 12 Disková sušárna odvodněných kalů ČOV Modřice [26]

4.3.2 Tenkovrstvá sušárna

V této sušárně je voda intenzivně odpařována z tenké vrstvy kalu (0,5 – 3,5 mm) na stěně dutého tělesa kuželového tvaru [21]. Vysušený kal je nepřetržitě seškrabáván a transportován k výstupnímu otvoru. Schéma tenkovrstvé sušárny je zobrazeno na obr. 13.



1. Odvodněný kal. 2. Vodní páry. 3. Vstup vyhřívacího média. 4. Sušený kal. 5. Výstup vyhřívacího média. 6. Pohon válce.

Obr. 13 Princip tenkovrstvé sušárny [21]

4.4 Sálavé sušení

U sálavého sušení je solární energie absorbována ve vlhkém kalu, kdy nejprve dojde k jeho ohřátí a následně k odpaření jeho vlhkosti. Mezi nejvýznamnější parametry sálavého sušení patří teplota, vlhkost a rychlost proudění okolního vzduchu, struktura a teplota sušeného kalu.

4.4.1 Solární sušárna

Metoda vysoušení kalu solární energií byla v minulosti používána na kalových polích. Kromě solární energie byla využívána přirozená schopnost okolního vzduchu odnámat kalům vlhkost. Tento způsob vysoušení čistírenských kalů se však již nepoužívá kvůli vysoké provozní náročnosti a nepříjemným pachovým emisím.

Moderní náhradou, pracující na stejném principu, jsou solární sušárny. Ve sklenicích solární záření ohřívá okolní vzduch a je absorbováno kalem. Vzduch nasycený vodní parou je regulačním zařízením odvětráván. Aby se netvořily anaerobní zóny, musí být vrstvy kalu pravidelně obráceny. Nároky na zastavěnou plochu sušárny vzrůstají s poklesem rozdílu teploty sušeného kalu a teploty média. Optimálního sušícího výkonu je dosahováno pouze v měsících s dostatkem slunečního záření, v ostatních měsících se kal výhradně shromažďuje. Závislost na ročním období a příznivém počasí lze vyřešit dodatečným přívodem energie. Pokud lze využít více různých zdrojů energie, např. odpadní teplo, bioplyn, redukuje se nutná plocha pro vysoušení a je možné kontinuálně sušit i v klimaticky nepříznivých měsících. Díky aerobní povaze sušícího procesu je eliminována pachová zátěž prostředí. Při vysoké provozní spolehlivosti je dosahováno stabilizovaného konečného produktu konstantní kvality. V praxi byly realizovány solární sušárny kalů pro 1 000 až 300 000 EO.

5 Spalování

Pokud kal nelze využít ke hnojení, kompostování nebo rekultivaci, mělo by dojít k jeho spalování. Spalování kalů je v některých evropských státech preferovaným způsobem řešení kalové otázky [27], kterým lze maximálně eliminovat rizika spojená s odstraněním kalů.

Energetická náročnost termální destrukce kalů závisí na obsahu a výhřevnosti sušiny v kalu. Spalování musí předcházet sušení nebo alespoň odvodnění, protože spalování kalů s malým obsahem sušiny je velmi energeticky náročné. Spalováním dochází k likvidaci organického obsahu kalu, hygienizaci, podstatnému zmenšení hmotnosti a objemu. Zbytkové množství zaujímá převážně sušina z anorganických pevných látek.

Režim spalování je třeba přesně řídit, aby bylo zaručeno zneškodnění hygienicky závadných látek, které jsou buď obsaženy ve spalovaném materiálu nebo vznikají při jeho spalování. Proces musí být doplněn účinným odloučením veškerých škodlivin ve spalinách. Kromě elektrofiltrů sloužících k zachycování popílků je vhodné zařadit také mokré či suché pračky plynů. Tato zařízení zaručují zachycení většiny toxických látek.

Mezi negativní vlastnosti spalování se řadí případné použití pomocného paliva a vysoké investiční náklady, jejichž snížení lze dosáhnout současným spalováním kalů s komunálními odpady. V následujících kapitolách, vypracovaných na základě literatury [28] a [29], bude pojednáno o běžně používaných technikách spalování.

5.1 Teorie spalování

Spalování je silně exotermická reakce, jejíž tepelný efekt se obvykle projevuje vytvořením plamene. Velikost tepelného efektu ovlivní skupenství vstupujících surovin a vystupujících produktů.

Oxidační reakci složek hořlaviny provází vznik hlavních produktů spalování, oxidu uhličitého (CO_2), vody (H_2O), a dalších zplodin spalování, oxidu siřičitého (SO_2), chlorovodíku (HCl) nebo fluorovodíku (HF).

Spalná teplota charakterizuje palivo z hlediska jeho technologického využití. Lze ji stanovit z bilance tepelné rovnováhy přijatého a vydaného tepla při spalování paliva:

$$Q_{ch} + Q_p + Q_{vz} = Q_{sp} + Q_{ned} + Q_{dis} + Q_z \quad (1)$$

Q_{ch} značí chemické teplo z výhřevnosti paliva.

Teplo přehřátého paliva Q_p se spočte podle vztahu:

$$Q_p = m_p \cdot c_{p,p} \cdot t_p, \quad (2)$$

kde $c_{p,p}$ značí měrnou tepelnou kapacitu paliva, m_p jeho hmotnost a t_p jeho teplotu.

Teplo přehřátého vzduchu Q_{vz} je určeno rovnicí:

$$Q_{vz} = c_{p,vz} \cdot t_{vz} \cdot \alpha \cdot V_{vzduch, min}, \quad (3)$$

kde $c_{p,vz}$ označuje měrnou tepelnou kapacitu vzduchu a t_{vz} jeho teplotu. $V_{vzduch, min}$ je minimální množství vzduchu potřebného ke spálení paliva. Součinitel α vyjadřuje přebytek vzduchu, který lze určit jako poměr skutečného objemu suchého spalovacího vzduchu a stechiometrického objemu nutného pro dokonalé spálení

kalu. Při spalování se obvykle přivádí více vzduchu, než je jeho stechiometrická potřeba.

Výstupní proudy tepla jsou vyjádřeny teplem spalin Q_{sp} , chemickým a mechanickým nedopalem Q_{ned} , disociačním teplem Q_{dis} a ztrátovým teplem Q_z . Teplo spalin je určeno množstvím spalin V_{sp} , měrnou tepelnou kapacitu spalin $c_{p,sp}$ a jejich teplotou t_{sp} takto:

$$Q_{sp} = V_{sp} \cdot c_{p,sp} \cdot t_{sp} \quad (4)$$

Vzájemným dosazením rovnic lze spočítat teplotu spalin, která vyjadřuje spalnou teplotu paliva:

$$t_{sp} = \frac{Q_{ch} + Q_p + Q_{vz} - Q_{ned} - Q_{dis} - Q_z}{V_{sp} \cdot c_{sp}} \quad (5)$$

Spalná teplota je teplotou spalin v okamžiku spálení za předpokladu dokonalého spalování. Skutečná spalná teplota je obtížně prakticky stanovitelná, protože závisí na vlastnostech paliva, podmínkách a průběhu spalovacího procesu. Proto se stanovují přibližné spalné teploty, které vystihují skutečnou spalnou teplotu jen při platnosti určitých omezení.

5.1.1 Adiabatická spalná teplota

Adiabatická spalná teplota t_{ad} slouží k určení vlastností paliva při adiabatických podmínkách přívodu i odvodu tepla. Stanovuje se pro dokonalé spalování při stechiometrické spotřebě vzduchu, kdy je součinitel přebytku vzduchu roven jedné. Z vlastností adiabatických dějů vyplývá:

$$Q_p = Q_{vz} = Q_{ned} = Q_{dis} = Q_z = 0 \quad (6)$$

Proto lze adiabatickou spalnou teplotu stanovit při znalosti výhřevnosti LHV pomocí vztahu:

$$t_{ad} = \frac{LHV}{V_{sp,min} \cdot c_{sp}}, \quad (7)$$

kde $V_{sp,min}$ je objem spalin při stechiometrické spotřebě vzduchu.

5.1.2 Teoretická spalná teplota

Pomocí teoretické spalné teploty $t_{sp,teor}$ lze srovnávat paliva, podmínky spalování a spotřebu spalovacího vzduchu. Při stechiometrické a nadstechiometrické spotřebě vzduchu platí pro její výpočet rovnost:

$$Q_{ned} = Q_{dis} = Q_z = 0. \quad (8)$$

Teoretickou spalnou teplotu lze vyjádřit podílem dle vztahu:

$$t_{sp,teor} = \frac{LHV + Q_p + Q_{vz}}{V_{sp} \cdot c_{sp}}. \quad (9)$$

5.1.3 Praktická spalná teplota

Praktická spalná teplota $t_{sp,prak}$ zohledňuje skutečné podmínky spalování, zahrnuje také odvody tepla do okolí a ostatní ztráty. Vypočte se pomocí následující rovnice:

$$t_{sp,prak} = \frac{Q_{ch} + Q_p + Q_{vz} - Q_{ned} - Q_{dis} - Q_z}{V_{sp} \cdot c_{sp}} \quad (10)$$

5.1.4 Spalné teplo a výhřevnost

Spalné teplo (*HHV*, Higher Heating Value) je takové množství tepla, které vznikne dokonalým spálením jednotkového množství paliva, pokud se spaliny ochladí na původní teplotu paliva a voda je získána v kapalném skupenství. Spalné teplo je větší než výhřevnost o teplo získané kondenzací vody, která vznikla spalováním paliva.

Výhřevnost (*LHV*, Lower Heating Value) je takové množství tepla, které vznikne dokonalým spálením jednotkového množství paliva, pokud se spaliny ochladí na původní teplotu paliva a voda je získána v plynném skupenství. Hodnota výhřevnosti odpovídá hodnotě spalného tepla zmenšeného o výparné teplo vody obsažené v palivu a vody vzniklé spalováním vodíku, jenž je vázaný v hořlavíně paliva.

5.1.5 Ztráta žiháním

Tuhé palivo se skládá z hořlaviny, popeloviny a vody. Složení hořlaviny se určuje pomocí elementární analýzy, která stanoví procentuální podíl hmotností uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku a spalitelné síry v hořlavíně. Nespalitelná síra je zahrnuta v obsahu popelovin. Popeloviny a voda jsou souhrnně označovány jako balastní podíly. Sumu bezvodých podílů v kalu lze označit jako sušinu.

Určením obsahu sušiny se podrobně zabývá norma ČSN EN 12880 Charakterizace kalů – Stanovení veškerých látek a obsahu vody. Hodnoty obsahu sušiny jsou udávány v hmotnostních procentech.

Hmotnost organiky m_h udává množství spalitelné složky neboli hořlaviny. Stanoví se jako rozdíl hmotnosti sušiny m_s a hmotnosti popela m_a :

$$m_h = m_s - m_a \quad (11)$$

Ztráta žiháním $Z\check{Z}$ je podílem hmotnosti hořlaviny m_h a hmotnosti sušiny m_s , vyjadřuje se procentuálním podílem:

$$Z\check{Z} = \frac{m_h}{m_s} \cdot 100\% \quad (12)$$

Touto problematikou se podrobněji zabývá norma ČSN EN 12879 Charakterizace kalů – Stanovení ztráty žiháním.

5.2 Spalovny

Proces termického zpracování kalů je specifickou problematikou, protože v kalu jsou často obsažené sloučeniny, jejichž produkty spalování jsou nebezpečné pro životní prostředí. Pro dokonalý tepelný rozklad všech těchto sloučenin, převážně sloučenin chloru a fluoru, musí být splněny určité podmínky. Aby spalování probíhalo požadovaným způsobem a vznikaly neškodné plynné látky, je nutno zajistit dodržení požadavků týkajících se turbulence, teploty a doby.

K dokonalé oxidaci všech sloučenin přispívá nadstechimetrický přívod kyslíku a jeho dokonalé promísení s uvolňovanými produkty. Dostatečně vysoká teplota při spalovacím procesu musí umožnit shoření i neprchavých spalitelných podílů.

Minimální teplota spalování je dána legislativou [29]. Pro odpady s obsahem chloru pod 1 % platí doba setrvání spalin 2 s při teplotě 850 °C. Pro odpady s obsahem chloru nad 1 % je předepsána doba setrvání spalin 2 s při teplotě 1100 °C. Vzniklé spaliny jsou před procesem jejich čištění ochlazovány na teplotu 200 °C. Tam dochází k odstranění tuhých škodlivin, emisí dioxinů a furanů a také oxidů dusíku. Spalovací zařízení jsou posuzována podle provedení ohniště na typy:

- roštové – s pevným roštem (šikmým, rovným), s pohyblivým roštem (natřásací, posuvné, otočné, válcové),
- etážové,
- s rotační pecí,
- se šachtovou pecí,
- s komorovou pecí,
- fluidní.

Nyní bude o nejvýznamnějších typech spaloven pojednáno podrobněji.

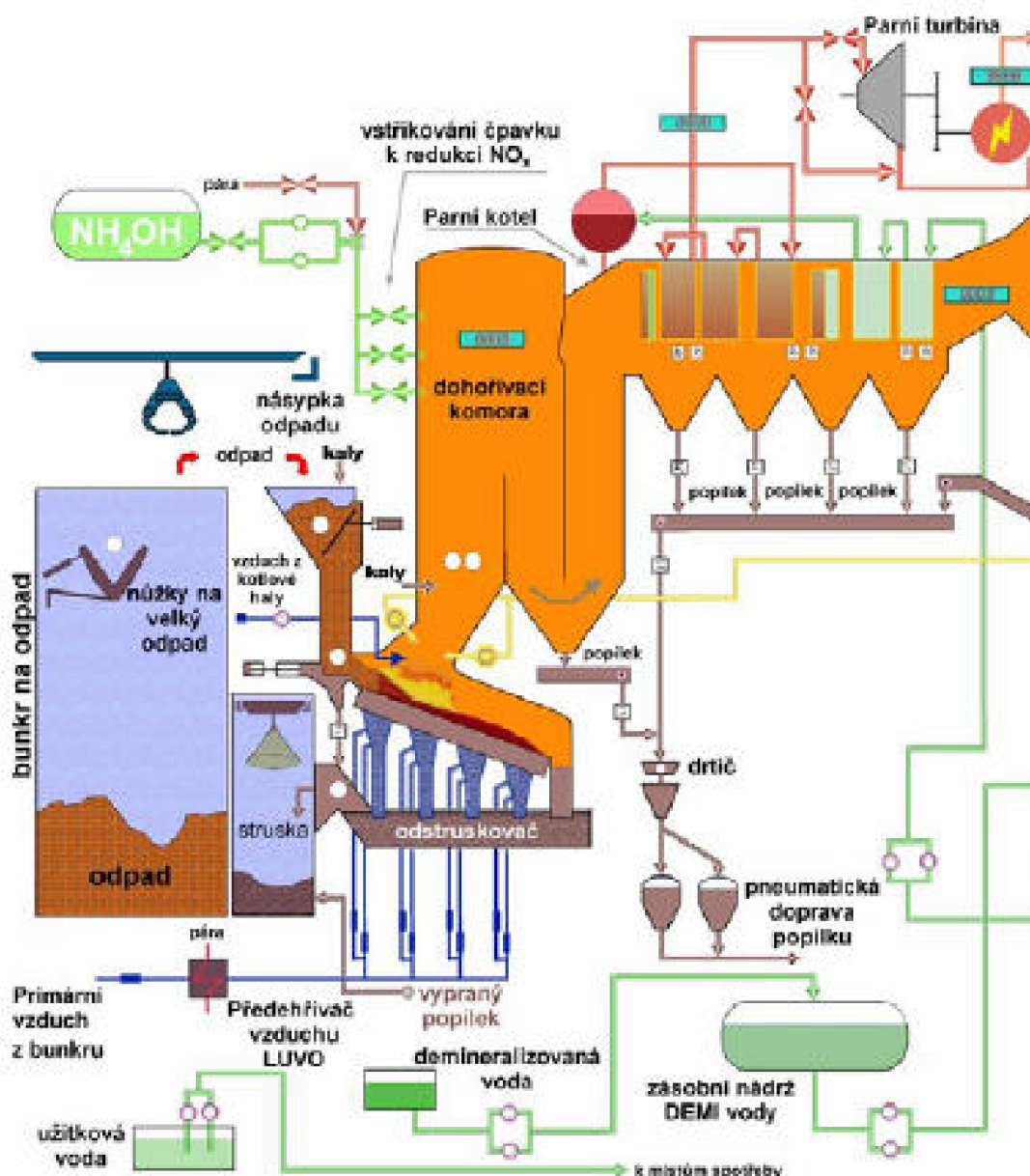
5.2.1 Roštová spalovna

Klasická koncepce spalovny (obr. 14) umožňuje spalování jakéhokoli typu tuhého odpadu. Spalování na roštu vychází z nejstaršího způsobu spalování pevných paliv. Spalovací cyklus prochází několika po sobě jdoucími fázemi, které závisí na teplotě v reakčním prostoru. První fází je vysušení, další odplyňování, zapálení, hoření a vyhoření. Důsledkem spalování se zmenšuje objem spalovaného materiálu. Výška lože z původní hodnoty až jednoho metru přechází na třetinovou až čtvrtinovou výšku vrstvy škváry nebo popela.

Pece s pevnými rošty jsou vhodné pro menší výkony, zatímco pece s pohyblivými rošty jsou spíše používány pro vyšší výkony spaloven. Rošt představuje nosná plocha s otvory pro přívod spalovacího vzduchu. Spalovaný materiál je dávkován seshora do reakční komory na rošt, kde probíhá vlastní spalování. Spalovací vzduch je přiváděn nejčastěji pod rošt. Vhodně navržený rošt umožňuje nejen oporu spalovaného materiálu při vlastním hoření, ale i dostatečný přívod vzduchu, dokonalé vyhoření odpadu a odvod tuhých zbytků po spálení.

Jako nejstarší řešení spalovací technologie je typ roštové spalovny stále zdokonalován, aby mohl konkurovat modernějším procesům. Jako hlavní nevýhody jsou uváděny nehomogenní prohořívání spalované látky na roštu. Ke zlepšení podmínek spalování se přistupuje úpravou roštové komory nebo dalším přívodem vzduchu. Případným zařazením podpurných hořáků se nejen lépe dosahuje potřebné zápalné teploty v reakční komoře, ale také stabilizuje proces hoření.

Typ spalovny s roštovým ohništěm je provozně velmi spolehlivý, bez obtíží dodržuje limity emisí a limitní hodnoty zbytkového organického uhlíku (menší nebo roven 3 %), resp. nedopalu (menší nebo roven 5 %) [30]. Tak vyhovuje požadavkům na optimální materiálové využití a bezpečné uložení zbytkových látek.

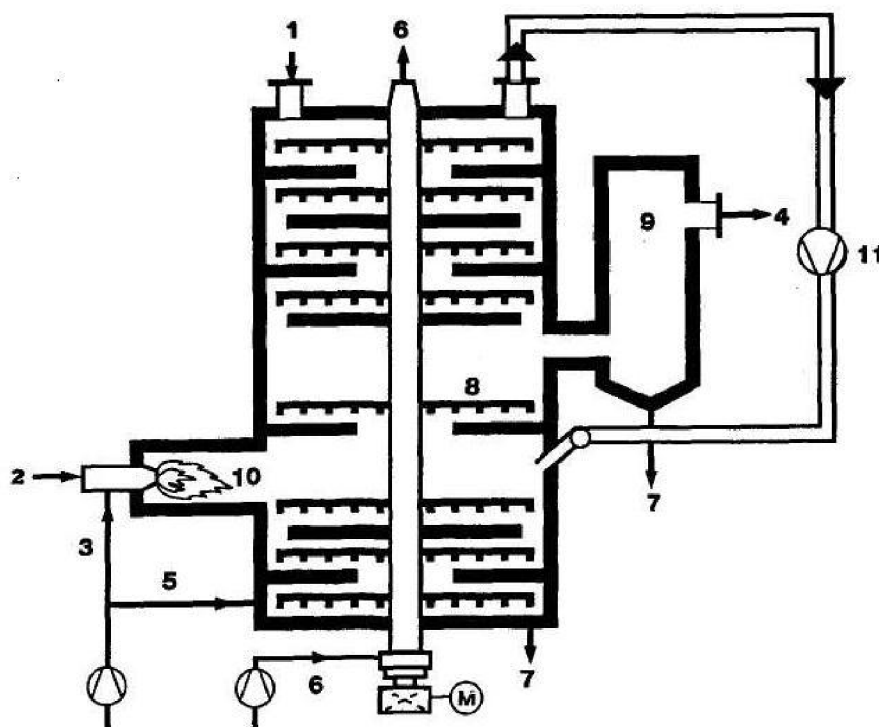


Obr. 14 Schéma spalovny odpadů [21]

5.2.2 Etážová spalovna

Zařízení etážové spalovny je konstruováno tak, aby vznikající spaliny svým teplem předehřívaly spalovanou surovinu a odpařily z ní vodu. Po předchozím vysušení se stane spalovaný materiál lépe spalitelným. Schéma etážové pece ukazuje obr. 15. Pec je válcového tvaru, po výšce rozdělena na etáže. V každé etáži je osová hřídel opatřena rameny s lopatkami ze žáruvzdorného materiálu. Lopatky jsou vhodně nastaveny tak, že otáčením hřídele postupuje palivo ke středu, kde otvorem propadne na nižší etáž. Tam je palivo hrnuto od středu k obvodu, kde opět propadne otvorem níže. Protože spalovaný kal takto prochází pecí ve spirále, je zajištěna dostatečně dlouhá doba k jeho spálení. Etáže v různé výšce mají odlišné funkce. Na horních etážích probíhá proces sušení, na středních etážích dochází ke spalování a dolní etáže jsou určeny k ochlazení popela.

Spalovací vzduch je do pece přiváděn zdola, tedy protiproudě k palivu. Odtah spalin je proveden v horní části pece, směs vodních par a spalin je recirkulována zpět do ohniště. V reakčním prostoru je dosahováno teplot až 900 °C.



1. Dávkování kalu. 2. Dávkování přídatného paliva. 3. Přívod spalovacího vzduchu. 4. Odvod spalin.
5. Vzduchem chlazený stupeň popela. 6. Vzduchem chlazený hřídél ohniště. 7. Odvod popela.

Obr. 15 Schéma etážové pece [21]

Pozitivní vlastností etážové pece je možnost spalovat kromě kalů také shrabky, tuky a oleje ze záchytných jímek, a tak plně zpracovat veškeré produkty vzniklé čištěním odpadních vod.

5.2.3 Rotační bubnová spalovna

Spalování v rotační bubnové peci je velmi odlišné od spalování na roštu. Použitím rotační pece lze dosáhnout rovnoměrného hoření paliva a docílit vyšších teplot v prostoru pece. Výměna tepla v reakčním prostoru pece probíhá sáláním plamene a spalin, konvekcí proudících spalin a kondukcí žhavé vyzdívky. Do rotační pece lze dávkovat palivo jakékoli konzistence, které může být také uzavřeno v obalech ze spalitelného materiálu.

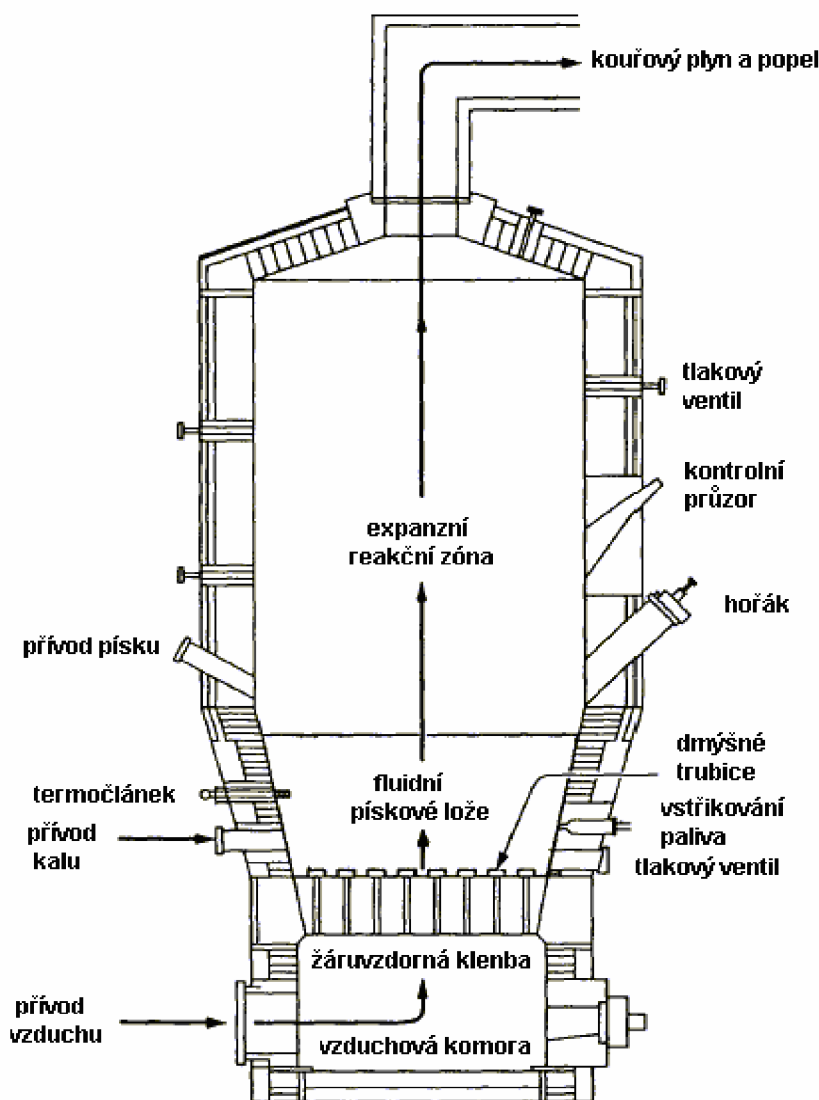
Do rotačního spalovacího bubnu, který je skloněn o asi 5°, ústí násypka pro materiál určený ke spalování. Na předním čele pece je umístěn zapalovací hořák a násypka, odvod tuhých zbytků po spalování je na protilehlém konci. Palivo a pecní plyny se pohybují souproudě, při pomalé rotaci bubnu dochází k nepřetržité homogenizaci a intenzivnímu promísení spalované látky. Neustálý pohyb spalovaného materiálu umožňuje taktéž dobrý kontakt se spalovacím vzduchem.

Spalovací proces probíhá v několika po sobě jdoucích etapách. V sušícím pásmu teplot do 400 °C nehoří materiál plamenem ani nevzniká struska. Kolem teploty 900 °C nastává pásmo odplynění, kdy hoří plynová směs s nízkým bodem zápalnosti na povrchu materiálu. Při dosažení teploty 1200 °C ve spalovacím pásmu

dochází k intenzivnímu spalování plynů. V poslední etapě jsou zbytky ze spáleného materiálu spékány do skelné formy. Po rychlém zchlazení tekuté strusky ve vodní lázni má struska vzhled drceného černého skla.

5.2.4 Fluidní spalovna

Fluidní spalovací pec (obr. 16) se skládá z válcového ocelového pláště, pískového lože (používá se křemičitý písek) a dna s tryskami pro vhánění fluidního vzduchu. Při určité rychlosti proudění vzduchu dojde ke vznosu částic, nastalý jev se podobá varu kapaliny.



Obr. 16 Fluidní spalovací pec [10]

Lože je dle [10] fluidizované vzduchem při tlaku 20 – 35 kPa, teplota pískového lože se pohybuje mezi 760 až 820 °C. Vroucí fluidní hmot a se chová jako kapalina, drží hladinu, teče a každá pevná částice koná volný pohyb omezený pouze stěnami pláště. Částice se vznášejí tak, že to opticky připomíná systém vodotrysků. V turbulentním proudění dochází k dokonalému kontaktu horkých plynů a tuhých částic. Rovnoměrným rozptýlením paliva ve žhavém prostoru fluidního lože se vypaří voda a zažehne sušina. Důsledkem intenzivního míchání vsázky ve zvířeném fluidním loži je její dokonalé spálení. Po celé výšce fluidního lože má směs stálou

teplotu. Při kontinuálním procesu nebo s dodržением krátkých přestávek není nutné pro zapálení pomocné palivo. Spalování ve fluidní vrstvě patří mezi nejmodernější technologie díky vynikajícímu přenosu tepla a homogennímu spalování.

U dna reaktoru se nevyskytuje žádný popel, protože odchází s kouřovými plyny. Plynné emise obsahují tuhé znečišťující látky (popeloviny), oxidy dusíku, kyselé plyny, uhlovodíky a těžké kovy. Jejich obsah závisí na složení kalu případně pomocného paliva. Díky relativně nízké teplotě hoření (v porovnání s klasickými spalovacími systémy) dochází k menší tvorbě oxidů dusíku a rovněž redukci zanášení ohniště struskou. Emise do ovzduší by měly splňovat legislativou stanovené kvalitativní požadavky.

6 Bilance sušení a spalování čistírenského kalu

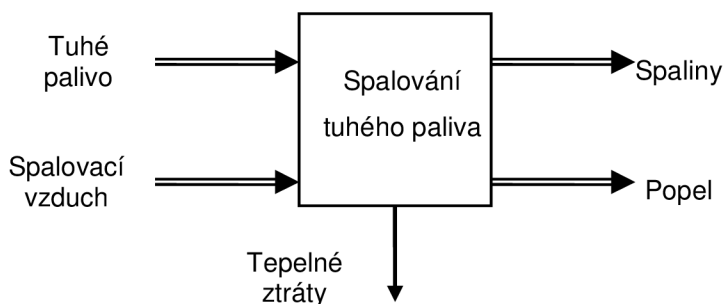
Složení kalu a elementární obsah prvků jeho hořlaviny patří mezi základní vstupní hodnoty výpočtu. Mezi další vstupní parametry jsou zařazeny teplota vstupního vzduchu, součinitel přebytku vzduchu, vstupní množství sušiny, obsah sušiny v kalu a jeho ztráta žíháním. Veškeré výpočty byly provedeny pomocí programu Microsoft Excel. Kapitola byla vypracována s použitím literatury [31].

6.1 Spalování kalu

Každé tuhé palivo je tvořeno hořlavinou, vodou a popelem. Jejich obsah je určen hmotnostními zlomky podle následujícího vztahu:

$$x_h + x_a + x_w = 1, \quad (13)$$

kde obsah hořlaviny v palivu je označen jako x_h , obsah popelovin v palivu jako x_a a obsah vody v palivu jako x_w . Při spalování tuhého paliva (obr. 17) patří mezi vstupní proudy tuhé palivo a spalovací vzduch, výstupní proudy procesu tvoří spaliny a popel. Tepelná bilance musí zahrnovat tepelné ztráty.



Obr. 17 Schéma spalovacího procesu tuhého paliva

6.1.1 Spalovací vzduch

Vlhký vzduch je směsí absolutně suchého vzduchu a vlhkosti v podobě vodní páry. Relativní vlhkost vzduchu φ vychází z obsahu vodní páry ve vlhkém vzduchu za dané teploty a tlaku. Lze ji vyjádřit následující rovnicí:

$$\varphi = \frac{y_{H_2O}}{y_{H_2O}^*} \cdot 100, \quad (14)$$

kde y_{H_2O} určuje koncentraci vodní páry ve vlhkém vzduchu, $y_{H_2O}^*$ znamená rovnovážnou koncentraci vodní páry ve vlhkém vzduchu, která je při použití Daltonova zákona určena jako podíl tlaku vzduchu p a tlaku nasycených par p^0 :

$$y_{H_2O}^* = \frac{p}{p^0} \quad (15)$$

Pro výpočet tlaku nasycených par p^0 vody při zadané teplotě T je použita Antoineova rovnice ve tvaru:

$$\log p^0 = \text{Ant}A - \frac{\text{Ant}B}{\text{Ant}C + T} \quad [31] \quad (16)$$

Použité koeficienty Antoineovy rovnice jsou konstantní, v teplotním intervalu do 100 °C nabývají pro vodu hodnoty dle následující tab. 2:

AntA	7,19621
AntB	1730,637
AntC	233,426

Tab. 2 Koeficienty Antoineovy rovnice

Objem složek suchého vzduchu je konstantní. Koncentrace složek vlhkého vzduchu $y_{i,vz}$ se určí pomocí složení suchého vzduchu $y_{i,s.v.}$ a koncentrace vodní páry y_{H_2O} :

$$y_{i,vz} = y_{i,s.v.} \cdot (1 - y_{H_2O}) \quad (17)$$

6.1.2 Výpočet spalného tepla z elementárního složení látky

Výpočet spalného tepla hořlaviny vychází z empirických vztahů. Pro jejich použití k určení spalného tepla je nutné znát elementární obsah prvků uhlíku, vodíku, síry, kyslíku, dusíku a chloru v hořlavině, obsah vody a popelovin v palivu.

V níže uvedených empirických výpočtech různých autorů je spalné teplo HHV vypočteno pro 100% hořlavinu a označeno jako HHV_h .

Použité symboly C_h , H_h , S_h , O_h označují obsah kyslíku, vodíku, síry a uhlíku v hořlavině [hm%].

Mendělejev:

$$HHV_h = 339 \cdot C_h + 1030 \cdot H_h + 109 \cdot (S_h - O_h) \quad (18)$$

Dulong:

$$HHV_h = 339,1 \cdot C_h + 1214,2 \cdot H_h - 151,8 \cdot O_h + 104,7 \cdot S_h \quad (19)$$

Institute of Gas Technology:

$$HHV_h = 341 \cdot C_h + 1322 \cdot H_h + 68,5 \cdot S_h - 120 \cdot (O_h - N_h) \quad (20)$$

Strache a Lant:

$$HHV_h = 340,6 \cdot C_h + 1432,4 \cdot H_h + 104,6 \cdot S_h - 153,2 \cdot O_h \quad (21)$$

Steuer:

$$HHV_h = 340,6 \cdot C_h + 1432,4 \cdot H_h + 104,6 \cdot S_h - 153,2 \cdot O_h \quad (22)$$

Grummel a Davies:

$$HHV_h = (15,22 \cdot H_h + 987,5) \cdot \left(\frac{C_h}{3} + H_h - \frac{O_h - S_h}{8} \right) \quad (23)$$

Michel:

$$HHV_h = 340,3 \cdot C_h + 1243,2 \cdot H_h + 62,8 \cdot N_h + 190,9 \cdot S_h - 98,4 \cdot O_h \quad (24)$$

Gumz:

$$HHV_h = 340,3 \cdot C_h + 1017,1 \cdot H_h + 62,8 \cdot N_h + 190,9 \cdot S_h - 98,4 \cdot O_h \quad (25)$$

Schuster:

$$HHV_h = 339 \cdot C_h + 1423 \cdot \left(H_h - \frac{O_h}{8} \right) + 92 \cdot S_h \quad (26)$$

Protože žádný z výše uvedených vztahů není určen přímo pro výpočet spalného tepla kalů, je v této práci spalné teplo paliva počítáno z aritmetického průměru empirických rovnic jako $HHV_{h,prům}$, který je přepočten pomocí obsahu hořlaviny v palivu x_h na spalné teplo paliva HHV_p :

$$HHV_p = HHV_{h,prům} \cdot x_h \quad (27)$$

Pokud není známo elementární složení hořlaviny paliva, je možné spalné teplo stanovit experimentálně kalorimetrickou metodou. O této problematice je podrobně pojednáno v normě ČSN ISO 1928 Tuhá paliva – Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti.

Kalorimetrie se zabývá měřením tepla při různých fyzikálních i chemických dějích. Používané zařízení je označováno jako kalorimetr.

6.1.3 Stanovení spalného tepla a výhřevnosti

Při výpočtu výhřevnosti se na rozdíl od spalného tepla uvažuje voda v kapalném stavu. Proto je třeba od spalného tepla odečíst součin množství celkové vody W_{celk} a výparného tepla vody ΔH_{vyp} , které při teplotě 20 °C nabývá hodnotu 2454 kJ/kg:

$$LHV = HHV - \Delta H_{vyp} \cdot W_{celk} \quad (28)$$

Množství celkové vody W_{celk} pochází z původní vlhkosti paliva x_w a z vody vzniklé jako produkt spalování vodíku z hořlaviny W_H :

$$W_{celk} = x_w + W_H \quad (29)$$

Množství vody vzniklé oxidací vodíku je založeno na následující stechiometrické rovnici:



Dosazením molárních hmotností látek lze obdržet:

$$2,016 \text{ kg } H + 16,000 \text{ kg } O_2 = 18,016 \text{ kg } H_2O, \quad (31)$$

z čehož se určí koeficient pro výpočet množství vody vzniklé ze spalitelného vodíku:

$$\frac{18,016}{2,016} = 8,94 \quad (32)$$

Koeficient, zaokrouhlený na hodnotu 8,94, vystupuje v následujícím vztahu, který popisuje závislost vlhkosti paliva x_w na obsahu spalitelného vodíku v palivu $x_{H,p}$:

$$x_w = 8,94 \cdot x_{H,p} \quad (33)$$

Pokud je v hořlavině paliva obsažen chlor, je nutné při výpočtu respektovat skutečnost, že část vodíku obsaženého v palivu přednostně reaguje s chlorem dle reakce:



Množství vodíku spalitelného na vodu se tedy sníží o jeho spotřebu H_{HCl} na vznik chlorovodíku HCl při reakci s chlorem. Toto množství je dáno poměrem molárních hmotností vodíku MW_H , chloru MW_{Cl} a obsahem chloru v hořlavíně Cl_h :

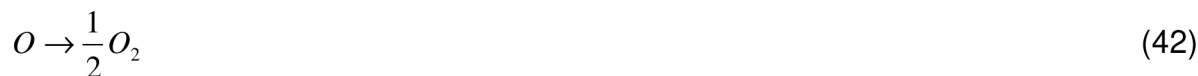
$$H_{HCl} = Cl_h \cdot \frac{MW_H}{MW_{Cl}} \quad (35)$$

Korigovaný obsah vodíku v hořlavíně $x_{H, kor}$ je určen jako rozdíl vodíku obsaženého v hořlavíně H_h a celkové spotřeby vodíku $H_{h, celk}$ na tvorbu HCl:

$$x_{H, kor} = H_h - \left(Cl_h \cdot \frac{MW_H}{MW_{Cl}} \right) \quad (36)$$

6.1.4 Hmotnostní bilance složek vzniklých spalin

Vznik spalin popisují následující rovnice:



Ve výpočtu jsou použity tyto předpoklady:

- veškerý dusík přechází do dvouatomové formy, nedochází ke vzniku oxidů dusíku NO_x ,
- spalování probíhá za dostatečného přívodu kyslíku, nedochází k nedokonalému spalování uhlíku a nevzniká oxid uhelnatý CO,
- obsah vodíku v palivu je dostatečný pro reakci s chlorem.

Určení stechiometrické spotřeby kyslíku $V_{O_2, stech}$ se provede jako součet kyslíku potřebného pro oxidaci hořlavých složek, který je zmenšený o množství kyslíku obsaženého v palivu. Koeficienty pocházejí ze stechiometrických rovnic pro vznik spalin, které platí pro látková množství. Proto je do rovnice kvůli přepočtu zařazen molární objem při normálních podmínkách V_n o hodnotě $22,414 \text{ m}^3 \text{ kmol}^{-1}$. Složení hořlaviny je uváděno v hmotnostních zlomcích, kde x_C značí obsah uhlíku, x_S obsah síry, x_O obsah kyslíku v hořlavíně. Ve vztahu vystupují také molární hmotnosti uhlíku MW_C , vodíku MW_H , síry MW_S a kyslíku MW_O :

$$V_{O_2, stech} = V_n \cdot \left(\frac{x_C}{MW_C} + \frac{0,25 \cdot x_{H, kor}}{MW_H} + \frac{x_S}{MW_S} - \frac{x_O}{2 \cdot MW_O} \right) \quad (43)$$

Teoretická spotřeba vzduchu na 1 kg hořlaviny $V_{vzduch, teor, h}$ je vyjádřena poměrem:

$$V_{vzduch, teor, h} = \frac{V_{O_2, stech}}{y_{O_2}} \quad (44)$$

Teoretická spotřeba vzduchu na 1 kg paliva $V_{vzduch,teor,p}$ je funkcí obsahu hořlaviny x_h :

$$V_{vzduch,teor,p} = \frac{V_{O_2,stech}}{y_{O_2}} \cdot x_h \quad (45)$$

Teoretickou spotřebu vzduchu $\dot{V}_{vzduch,teor}$, nutnou pro spálení daného množství paliva \dot{m}_p , udává rovnice:

$$\dot{V}_{vzduch,teor} = V_{vzduch,teor,p} \cdot \dot{m}_p \quad (46)$$

Spotřeba vzduchu na spálení 1 kg hořlaviny $V_{vzduch,h}$ se v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu α změří takto:

$$V_{vzduch,h} = \frac{V_{O_2,stech}}{y_{O_2}} \cdot \alpha \quad (47)$$

Spotřeba vzduchu na spálení 1 kg paliva $V_{vzduch,p}$ se v závislosti na přebytku vzduchu α změří takto:

$$V_{vzduch,p} = x_h \cdot \alpha \cdot \frac{V_{O_2,stech}}{y_{O_2}} \quad (48)$$

Celkové množství vzduchu $\dot{V}_{vzduch,celk,kal}$, nutné pro spálení daného množství paliva \dot{m}_p , udává rovnice:

$$\dot{V}_{vzduch,celk,kal} = V_{vzduch,p} \cdot \dot{m}_p \quad (49)$$

Objemy vzniklých spalin jsou tvořeny složkami spalovacího vzduchu a produkty stechiometrických reakcí podle výše uvedených rovnic.

Voda z vlhkosti odpadu přechází do spalin ve formě vodní páry.

$$V_{H_2O,sp,kal} = x_h \cdot V_n \cdot \frac{0,5 \cdot x_{H,kor}}{MW_H} + \frac{x_w}{MW_{H_2O}} \cdot V_n + V_{vzduch} \cdot y_{vzduch,H_2O} \quad (50)$$

$$V_{CO_2,sp,kal} = x_h \cdot V_n \cdot \frac{x_C}{MW_C} + V_{vzduch} \cdot y_{vzduch,CO_2} \quad (51)$$

$$V_{O_2,sp,kal} = V_{vzduch} \cdot y_{vzduch,O_2} - V_{O_2,stech} \quad (52)$$

$$V_{N_2,sp,kal} = x_h \cdot V_n \cdot \frac{0,5 \cdot x_N}{MW_N} + V_{vzduch} \cdot y_{vzduch,N_2} \quad (53)$$

$$V_{Ar,sp,kal} = V_{vzduch} \cdot y_{vzduch,Ar} \quad (54)$$

$$V_{SO_2,sp,kal} = x_h \cdot V_n \cdot \frac{x_S}{MW_S} + V_{vzduch} \cdot y_{vzduch,SO_2} \quad (55)$$

$$V_{HCl,sp,kal} = x_h \cdot V_n \cdot \frac{x_{Cl}}{MW_{Cl}} + V_{vzduch} \cdot y_{vzduch,HCl} \quad (56)$$

Celkový objem spalín $V_{sp,kal}$ se vypočte jako součet objemů všech složek spalín:

$$V_{sp,kal} = \sum_i V_{i,sp,kal} \quad (57)$$

Koncentrace jednotlivé složky spalín $y_{i,sp,kal}$ je rovna podílu objemu složky $V_{i,sp,kal}$ a celkového objemu všech složek spalín $V_{sp,kal}$:

$$y_{i,sp,kal} = \frac{V_{i,sp,kal}}{\sum_i V_{i,sp,kal}} \quad (58)$$

6.1.5 Tepelná bilance

Měrná entalpie vzduchu h_{vzduch} při teplotě T_{vzduch} se určí jako součet příspěvků složek dle následující rovnice:

$$h_{vzduch} = \sum_i y_{i,vz} \cdot h_{i,vzduch} \quad (59)$$

kde $y_{i,vz}$ je objemový zlomek složky ve směsi a $h_{i,vzduch}$ měrná entalpie složky.

Při výpočtu entalpie složky plynné směsi přísluší každé složce jiné konstanty K_i , L_i , M_i , N_i , O_i , které jsou dosazeny do následujícího polynomu:

$$h_{i,vzduch} = \left(K_i \cdot t_{0,vzduch} + L_i \cdot t_{1,vzduch} + M_i \cdot t_{2,vzduch} + N_i \cdot t_{3,vzduch} - \left(\frac{O_i}{T} - \frac{O_i}{273,15} \right) \right) \cdot \frac{1}{V_n} \quad (60)$$

Uvedené teploty $t_{0,vzduch}$, $t_{1,vzduch}$, $t_{2,vzduch}$ a $t_{3,vzduch}$ jsou určeny z následujících vztahů:

$$t_{0,vzduch} = T_{vzduch} - 273,15 \quad (61)$$

$$t_{1,vzduch} = \frac{T_{vzduch}^2 - 273,15^2}{2} \quad (62)$$

$$t_{2,vzduch} = \frac{T_{vzduch}^3 - 273,15^3}{3} \quad (63)$$

$$t_{3,vzduch} = \frac{T_{vzduch}^4 - 273,15^4}{4} \quad (64)$$

Entalpie vzduchu H_{vzduch} je vyjádřena součinem průtoku V_{vzduch} a měrné entalpie h_{vzduch} :

$$H_{vzduch} = h_{vzduch} \cdot V_{vzduch} \quad (65)$$

Do tepelné bilance uzlu vstupují vzduch a uvolněné teplo ze spalování kalu, vystupují spaliny a popeloviny. Teplota spalín se určí iteračně funkcí řešitele z tepelné rovnováhy vstupních a výstupních složek uzlu.

6.2 Spalování zemního plynu

Zemní plyn (ZP) je plynné palivo, které obsahuje spalitelné uhlovodíky (metan, etan a další) a inertní složky, které se oxidačních reakcí nezúčastňují (dusík, oxid uhličitý). Při spalování ZP probíhají kromě jiných tyto stechiometrické reakce:





Obecná stechiometrická reakce spalování uhlovodíků lze vyjádřit takto:



Výhřevnost zemního plynu LHV_{ZP} závisí na výhřevnostech jeho složek $LHV_{i,ZP}$:

$$LHV_{ZP} = \sum_i \frac{y_{i,ZP}}{100} \cdot LHV_{i,ZP}, \quad (69)$$

kde $y_{i,ZP}$ zastupuje objemovou koncentraci složky v zemním plynu.

Stechiometrická spotřeba kyslíku $V_{O_2,stech}$ závisí na číselných konstantách ze spalovacích rovnic, určí se jako součet množství kyslíku potřebného pro oxidaci hořlaviny zmenšený o množství kyslíku obsažené v palivu:

$$V_{O_2,stech} = 2 \cdot y_{CH_4} + 3,5 \cdot y_{C_2H_6} + \frac{1}{2} y_{H_2} + \frac{1}{2} y_{CO} + \dots - y_{O_2} \quad (70)$$

Teoretická spotřeba vzduchu $V_{vzduch,teor,ZP}$ se stanoví jako podíl stechiometrické spotřeby kyslíku a koncentrace kyslíku ve vzduchu:

$$V_{vzduch,teor,ZP} = \frac{V_{O_2,stech}}{y_{O_2,vzduch}} \quad (71)$$

Skutečná spotřeba vzduchu $V_{vzduch,skut,ZP}$ závisí na součiniteli přebytku vzduchu α :

$$V_{vzduch,skut,ZP} = V_{vzduch,teor,ZP} \cdot \alpha \quad (72)$$

Celková spotřeba vzduchu $V_{vzduch,celk,ZP}$ ke spálení daného množství paliva se určí:

$$\dot{V}_{vzduch,celk,ZP} = V_{vzduch,skut,ZP} \cdot \dot{V}_{ZP}, \quad (73)$$

kde \dot{V}_{ZP} je objemový průtok zemního plynu.

Spaliny vzniklé stechiometrickým spalováním ZP jsou tvořeny nespalitelnými inertními sloučeninami ZP a všemi složkami spalovacího vzduchu kromě kyslíku. Koeficienty tvorby H_2O a CO_2 pro jednotlivé složky ZP v následujících rovnicích vycházejí ze stechiometrie:

$$V_{H_2O,sp,ZP} = 2 \cdot y_{CH_4,ZP} + 3 \cdot y_{C_2H_6,ZP} + 4 \cdot y_{C_3H_8,ZP} + 5 \cdot y_{C_4H_{10},ZP} + 6 \cdot y_{C_5H_{12},ZP} + 7 \cdot y_{C_6H_{14},ZP} + y_{H_2O,ZP} + V_{vzduch,ZP} \cdot y_{H_2O,vzduch} \quad (74)$$

$$V_{CO_2,sp,ZP} = y_{CH_4,ZP} + 2 \cdot y_{C_2H_6,ZP} + 3 \cdot y_{C_3H_8,ZP} + 4 \cdot y_{C_4H_{10},ZP} + 5 \cdot y_{C_5H_{12},ZP} + 6 \cdot y_{C_6H_{14},ZP} + y_{CO_2,ZP} + V_{vzduch,ZP} \cdot y_{CO,vzduch} \quad (75)$$

$$V_{N_2,sp,ZP} = y_{N_2,ZP} + V_{vzduch,ZP} \cdot y_{N_2,vzduch} \quad (76)$$

$$V_{Ar,sp,ZP} = y_{Ar,ZP} + V_{vzduch,ZP} \cdot y_{Ar,vzduch} \quad (77)$$

Množství kyslíku ve spalinách $V_{O_2,sp,ZP}$ závisí na jeho stechiometrické spotřebě, o kterou je zmenšeno:

$$V_{O_2,sp,ZP} = V_{vzduch,ZP} \cdot y_{O_2,vzduch} \cdot \frac{\alpha - 1}{\alpha} \quad (78)$$

Celkový objem spalin $V_{sp,ZP}$ je roven součtu objemů jednotlivých složek:

$$V_{sp,ZP} = \sum_i V_{i,sp,ZP} \quad (79)$$

Koncentrace jednotlivých složek spalin $y_{i,sp,ZP}$ se stanoví jako podíl objemu složky $V_{i,sp,ZP}$ a celkového objemu spalin $V_{sp,ZP}$:

$$y_{i,sp,ZP} = \frac{V_{i,sp,ZP}}{V_{sp,ZP}} \quad (80)$$

Objemový průtok spalin $V_{sp,celk,ZP}$ je určen pomocí následujícího vztahu jako součin celkového objemu spalin $V_{sp,ZP}$ a průtoku zemního plynu V_{ZP} :

$$\dot{V}_{sp,celk,ZP} = V_{sp,ZP} \cdot \dot{V}_{ZP} \quad (81)$$

Měrná entalpie plynné směsi ZP h_{ZP} se při teplotě T_{ZP} určí jako součet příspěvků složek v rovnici:

$$h_{ZP} = \sum_i y_{i,ZP} \cdot h_{i,ZP}, \quad (82)$$

kde $h_{i,ZP}$ je měrná entalpie složky ZP. Při výpočtu entalpie složky plynné směsi ZP každé jeho složce přísluší jiné konstanty P_i , R_i , S_i , U_i a Z_i , které jsou dosazeny do následujícího polynomu:

$$h_{i,ZP} = \left(P_i \cdot t_{0,ZP} + R_i \cdot t_{1,ZP} + S_i \cdot t_{2,ZP} + U_i \cdot t_{3,ZP} - \left(\frac{Z_i}{T} - \frac{Z_i}{273,15} \right) \right) \cdot \frac{1}{V_n} \quad (83)$$

Uvedené teploty $t_{0,ZP}$, $t_{1,ZP}$, $t_{2,ZP}$ a $t_{3,ZP}$ jsou určeny z následujících vztahů:

$$t_{0,ZP} = T_{ZP} - 273,15 \quad (84)$$

$$t_{1,ZP} = \frac{T_{ZP}^2 - 273,15^2}{2} \quad (85)$$

$$t_{2,ZP} = \frac{T_{ZP}^3 - 273,15^3}{3} \quad (86)$$

$$t_{3,ZP} = \frac{T_{ZP}^4 - 273,15^4}{4} \quad (87)$$

Teplota spalin se určí funkcí řešitele z tepelné rovnováhy vstupních a výstupních složek uzlu.

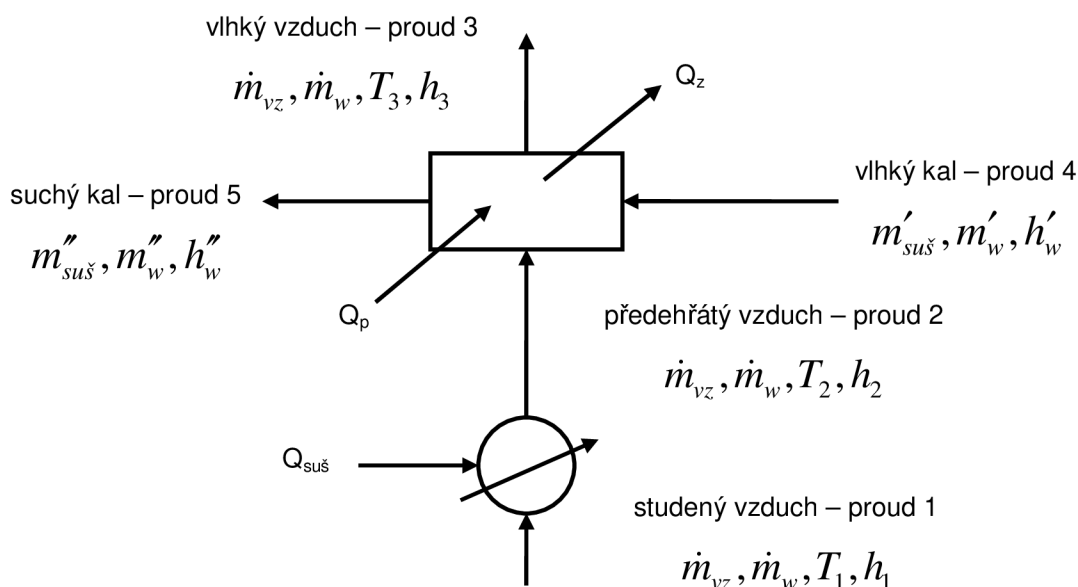
6.3 Sušení vzduchem

Bilance teoretické jednostupňové sušárny vychází ze schématu na obr. 18. V materiálové bilanci představují vstupní proudy hmotnostní tok sušiny $m_{suš}$, hmotnostní tok vody m'_w ve vlhkém kalu a hmotnostní tok sušícího vzduchu m_{vz} . Výstupní proudy tvoří hmotnostní tok sušiny $m_{suš}$, hmotnostní tok vody ve vysušeném kalu m''_w a hmotnostní tok sušícího vzduchu m_{vz} :

$$\dot{m}_{suš} + \dot{m}'_w + \dot{m}_{vz} = \dot{m}_{suš} + \dot{m}''_w + \dot{m}_{vz} \quad (88)$$

V tepelné bilanci vystupují kromě zmíněných hmotnostních toků vstupní proudy entalpie sušiny h'_s , entalpie vody ve vlhkém kalu h'_w , entalpie sušícího vzduchu h_1 , teplo $Q_{suš}$ dodané sušícímu vzduchu a přídavné teplo $Q_{př}$. Ve výstupních proudech vystupují entalpie sušiny h''_s , entalpie vody ve vysušeném kalu h''_w , entalpie sušícího vzduchu h_3 a ztrátové teplo Q_z :

$$\dot{m}'_{suš} \cdot h'_s + \dot{m}'_w \cdot h'_w + \dot{m}_{vz} \cdot h_1 + Q_{suš} + Q_{př} = \dot{m}''_{suš} \cdot h''_s + \dot{m}''_w \cdot h''_w + \dot{m}_{vz} \cdot h_3 + Q_z \quad (89)$$



Obr. 18 Bilance teoretické jednostupňové sušárny

Při výpočtu teoretické sušárny platí určité zjednodušující podmínky:

- Nejsou uvažovány tepelné ztráty Q_z ani přídavné teplo $Q_{př}$ k ohřevu transportního zařízení.
- Entalpie sušeného materiálu je považována za konstantní.
- Entalpie volné vlhkosti h'_w je vzhledem k hodnotě výparného tepla zanedbatelná.
- Množství vzduchu m_{vz} je konstantní.

Mezi vstupní hodnoty náleží množství sušiny $m_{suš}$, vstupní D_{in} a výstupní D_{out} obsah sušiny v kalu.

Parametry sušícího vzduchu se shodují s parametry spalovacího vzduchu. Složení sušícího vzduchu je přepočteno z objemové koncentrace $V_{i,vzduch,suš}$ na hmotnostní koncentraci $x_{i,vzduch,suš}$ při předpokladu vzduchu jako ideálního plynu pomocí vzorce:

$$x_{i,vzduch,suš} = \frac{V_{i,vzduch,suš} \cdot MW_i}{\sum V_{i,vzduch,suš} \cdot MW_i} \quad (90)$$

Každý kilogram vzduchu pohltí množství vody $m_{w,1kg\ vzduch}$, které odpovídá rozdílu měrných vlhkostí proudu vzduchu 3 x_{out} a proudu vzduchu 2 x_{in} :

$$m_{w,1kg\ vzduch} = x_{out} - x_{in} \quad (91)$$

Měrná vlhkost x_i je definována jako poměr hmotnosti páry $m_{páry}$ a hmotnosti suchého vzduchu $m_{s.v.}$:

$$x = \frac{m_{páry}}{m_{s.v.}} \quad (92)$$

Lze ji také stanovit pomocí relativní vlhkosti φ a tlaku nasycených par p_p'' :

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_p''}{p_{suš} - \varphi \cdot p_p''} \quad (93)$$

Tabelované hodnoty tlaku nasycených par p_p'' jsou určeny pro příslušné teploty vzduchu na vstupu a výstupu ze sušárny. Sušárny pracují v oblasti mírného podtlaku kvůli pachovým emisím do ovzduší, proto je tlak $p_{suš}$ volen 98 kPa.

Hmotnost vody ve vstupním proudu kalu m'_w se stanoví dle vztahu:

$$m'_w = \frac{m_{suš}}{D_{in}} - m_{suš} \quad (94)$$

Hmotnost vody ve výstupním proudu kalu m''_w se vypočte následujícím způsobem:

$$m''_w = \frac{m_{suš}}{D_{out}} - m_{suš} \quad (95)$$

Odpařená voda z kalu $m_{w,odpař,suš.v.}$ se stanoví jako rozdíl hmotnosti vody ve vstupním a výstupním proudu kalu:

$$\dot{m}_{w,odpař,suš.v.} = \dot{m}'_w - \dot{m}''_w \quad (96)$$

Průtok suchého vzduchu $V_{suš.v.}$ vychází z podílu odpařené vody z kalu $m_{w,odpař,suš.v.}$ a množství vody pohlcené kilogramem vzduchu $m_{w,1kg\ vzduch}$:

$$V_{suš.v.} = \frac{\dot{m}_{w,odpař,suš.v.}}{m_{w,1kg\ vzduch}} \quad (97)$$

Měrná tepelná kapacita vody $c_{p,w}$ nabývá hodnoty $4,186 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Hodnota měrné tepelné kapacity sušiny $c_{p,suš}$ je rovna $2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [32].

Vstupní proudy do tepelné bilance sušárny zahrnují teplo Q_1 proudu vzduchu 1 a teplo $Q_{suš}$. Teplo $Q_{suš}$ je nutné dodat vzduchu k vyrovnání potřeby výparného tepla vody. Součet Q_1 a $Q_{suš}$ představuje celkové dodané teplo Q_2 proudem vzduchu 2 do sušárny. K výpočtu entalpií vzduchu byly použity vzorce z kapitoly 6.1.5.

Výstupní proudy tvoří teplo na ohřátí kalu $Q_{kal,ohřev}$, teplo na odpaření vody z kalu $Q_{kal,odpař}$ a teplo Q_3 výstupního proudu vzduchu 3. Teplo na odpaření vody obsažené v kalu se vypočte pomocí výparného tepla vody a množství odpařené vody z kalu. Teplota proudu vzduchu 2 je funkcí řešitele iteračně určena tak, aby rozdíl dodaného a spotřebovaného tepla byl nulový.

6.4 Sušení pomocí termooleje

Teplonosným médiem na bázi organosilikátů je dietylpolysiloxan (silikonový olej), jehož termodynamické vlastnosti závisí na teplotě.

Mezi vstupní hodnoty uzlu náleží vstupní $T_{o,in}$ a výstupní teplota $T_{o,out}$ termooleje, vstupní D_{in} a výstupní hodnota sušiny D_{out} , množství sušiny kalu $m_{suš}$. Hmotnostní tok termooleje m_o , který je potřebný k vysušení zadaného množství kalu o daných parametrech, se dopočítává z bilance uzlu.

Měrná tepelná kapacita termooleje $c_{p,o}$ se vyčíslí podle polynomického rozvoje z tabelovaných dat uvedených v [33] takto:

$$c_{p,o} = 2,0392 + 0,0008 \cdot T_o + 3 \cdot 10^{-6} \cdot T_o^2 \quad (98)$$

Měrná tepelná kapacita oleje při vstupní $c_{p,o,in}$ a výstupní teplotě $c_{p,o,out}$ se vypočte dosazením příslušných teplot do polynomického rozvoje:

$$c_{p,o,in} = 2,0392 + 0,0008 \cdot T_{o,in} + 3 \cdot 10^{-6} \cdot T_{o,in}^2 \quad (99)$$

$$c_{p,o,out} = 2,0392 + 0,0008 \cdot T_{o,out} + 3 \cdot 10^{-6} \cdot T_{o,out}^2 \quad (100)$$

Pro určení tepla dodaného termoolejem je použita střední měrná tepelná kapacita oleje $c_{p,o,stř}$, která vychází z integrace polynomického rozvoje měrné tepelné kapacity podle teploty:

$$c_{p,o,stř} = \frac{1}{T_{o,in} - T_{o,out}} \int_{T_{o,out}}^{T_{o,in}} c_{p,o} dT \quad (101)$$

Hodnota měrné tepelné kapacity kalu $c_{p,k}$ se mění v závislosti na vstupní a výstupní hodnotě sušiny D_{in} a D_{out} . Měrná tepelná kapacita kalu na vstupu do sušárny $c_{p,k,in}$ se vypočte podle vztahu:

$$c_{p,k,in} = c_{p,w} \cdot (100 - D_{in}) + D_{in} \cdot c_{p,w} \quad (102)$$

Měrná tepelná kapacita kalu na výstupu ze sušárny $c_{p,k,out}$ se určí pomocí vzorce:

$$c_{p,k,out} = c_{p,w} \cdot (100 - D_{out}) + D_{out} \cdot c_{p,w} \quad (103)$$

Pro bilanci tepla přijatého od termooleje je použita průměrná měrná tepelná kapacita kalu $c_{p,k,prům}$ spočtená jako aritmetický průměr měrných tepelných kapacit při vstupní a výstupní teplotě:

$$c_{p,k,prům} = \frac{c_{p,k,in} + c_{p,k,out}}{2} \quad (104)$$

Teplu přivedené termoolejem Q_o je funkcí množství termooleje m_o , jeho průměrné měrné tepelné kapacity $c_{p,o,prům}$ a jeho vstupní $T_{o,in}$ a výstupní teploty $T_{o,out}$.

$$Q_o = m_o \cdot c_{p,o,prům} \cdot (T_{o,in} - T_{o,out}) \quad (105)$$

Teplu na odpaření vody z kalu Q_w je přímo úměrné výparnému teplu vody ΔH_{VYP} a množství odpařené vody $m_{w,odpař,suš.t.}$, které se stanoví jako rozdíl množství vody ve vstupním a výstupním proudu kalu.

$$Q_w = \dot{m}_{w,odpař,suš.t.} \cdot \Delta H_{VYP} \quad (106)$$

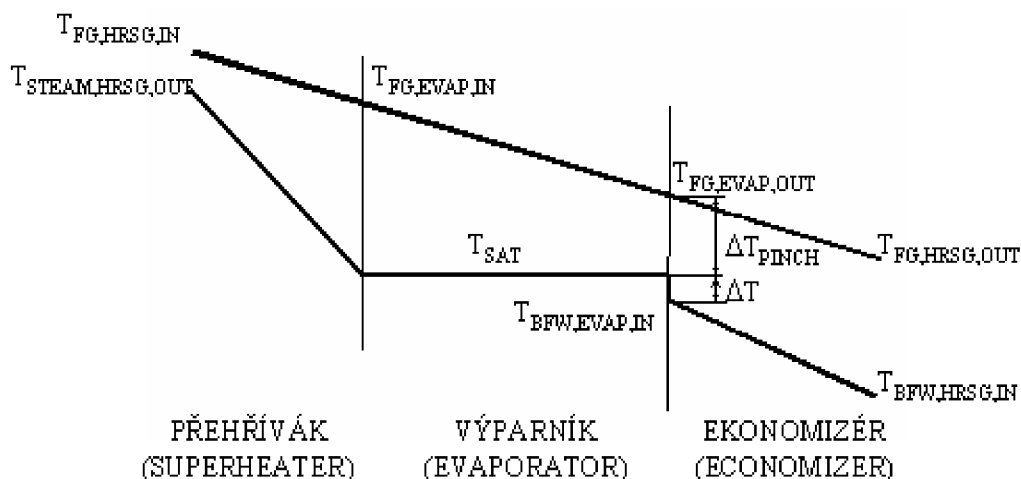
Teplu na ohřátí kalu Q_k závisí na množství sušiny $m_{suš}$, měrné tepelné kapacitě sušiny $c_{p,suš}$, teplotě kalu v sušárně $T_{k,suš}$, vstupní teplotě kalu do sušárny $T_{k,in}$, vstupní hodnotě sušiny D_{in} a měrné tepelné kapacitě vody $c_{p,w}$ podle následující rovnice:

$$Q_k = \dot{m}_{suš} \cdot c_{p,suš} \cdot (T_{k,suš} - T_{k,in}) + \frac{\dot{m}_{suš}}{D_{in}} \cdot (1 - D_{in}) \cdot c_{p,w} \cdot (T_{k,suš} - T_{k,in}) \quad (107)$$

Vstupní proud uzlu tvoří teplo přivedené termoolejem, výstupní proud součet tepel k ohřátí kalu a k odpaření vody z kalu. Rozdíl výstupních a vstupních proudů je funkcí řešitele iteračně nulován při proměnlivé hodnotě hmotnostního toku termooleje, která je žádanou neznámou. Použitá energetická bilance zanedbává přenos tepla přes plochy a tepelné ztráty sušárny.

6.5 Kotel na odpadní teplo

Kotel na odpadní teplo bývá označován zkratkou HRSG dle anglického názvosloví heat recovery steam generator. V kotli se nespaluje palivo, kotel pouze využívá odpadní teplo spalin z předchozího spalování kalu. Jejich množství a teplota vycházejí z předešlých výpočtů. Použitý model se skládá z ekonomizéru, výparníku a přehříváku. Teplotní profil všech tří složek kotle je zobrazen na obr. 19. V žádném jeho místě nesmí dojít k překřížení teplotních profilů jednotlivých proudů, aby mohla probíhat výměna tepla mezi spalinami a vodou. Dostatečný rozdíl teplot proudů podporuje přenos tepla.



Obr. 19 Teplotní profil HRSG

Minimální teplotní přiblížení ΔT_{PINCH} vyjadřuje rozdíl teploty spalin na výstupu z výparníku $T_{FG,EVAP,OUT}$ a teploty sytosti napájecí vody T_{SAT} , má zásadní vliv na množství vznikající páry a výstupní teplotu spalin:

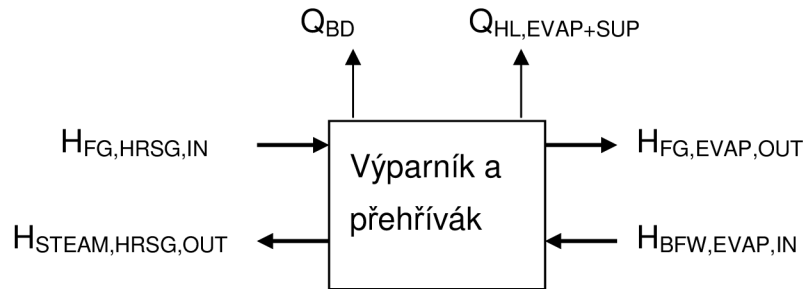
$$\Delta T_{PINCH} = T_{FG,EVAP,OUT} - T_{SAT} \quad (108)$$

Rozdíl teplot ΔT se stanoví pomocí rozdílu teploty napájecí vody na mezi sytosti T_{SAT} a vody na výstupu z ekonomizéru $T_{BFW,ECO,OUT}$:

$$\Delta T = T_{SAT} - T_{BFW,ECO,OUT} \quad (109)$$

Bilance se řeší ve dvou krocích, nejprve pro uzel přehřívák a výparník (obr. 20):

$$H_{FG,HRSG,IN} + H_{BFW,EVAP,IN} = H_{FG,EVAP,OUT} + H_{STEAM,HRSG,OUT} + Q_{HL,EVAP+SUP} + Q_{BD} \quad (110)$$



Obr. 20 Tepelná bilance výparníku a přehříváku

Vstupní proudy tepelné bilance uzlu tvoří:

- entalpie spalin na vstupu do HRSG $H_{FG,HRSG,IN}$ (zároveň vyjadřující entalpii spalin na vstupu do přehříváku),
- entalpie napájecí vody na vstupu do výparníku $H_{BFW,EVAP,IN}$ (současně vyjadřující entalpii napájecí vody na výstupu z ekonomizéru).

Mezi výstupní proudy tepelné bilance uzlu patří:

- entalpie spalin na výstupu z výparníku $H_{FG,EVAP,OUT}$ (současně vyjadřující entalpii spalin na vstupu do ekonomizéru),
- entalpie páry na výstupu z HRSG $H_{STEAM,HRSG,OUT}$ (zároveň vyjadřující entalpii páry na výstupu z přehříváku),
- tepelné ztráty výparníku a přehříváku $Q_{HL,EVAP+SUP}$, které se určí z následující rovnice (111), kde k_{HL} představuje součinitel tepelných ztrát:

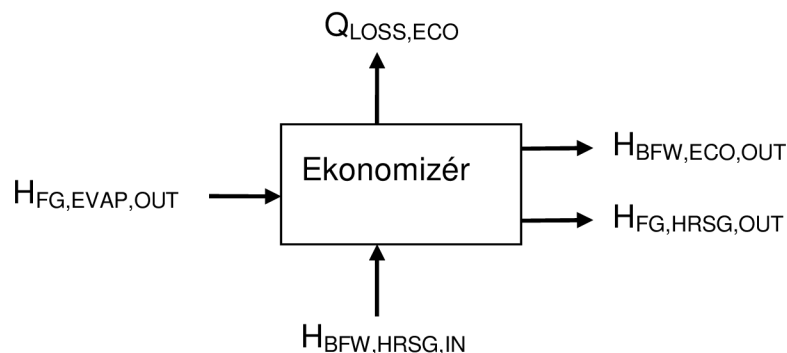
$$Q_{HL,EVAP+SUP} = k_{HL} \cdot (H_{FG,HRSG,IN} - H_{FG,EVAP,OUT}) \quad (111)$$

- tepelné ztráty odluhem Q_{BD} , jež závisí na součiniteli odluhu k_{BD} , množství napájecí vody m_{BFW} , entalpii syté napájecí vody $h_{BFW,SAT}$ a entalpii napájecí vody $h_{BFW,HRSG,OUT}$ na výstupu z HRSG takto:

$$Q_{BD} = k_{BD} \cdot \dot{m}_{BFW} (h_{BFW,SAT} - h_{BFW,HRSG,OUT}) \quad (112)$$

Dalším krokem je bilance ekonomizéru (obr. 21):

$$H_{FG,EVAP,OUT} + H_{BFW,HRSG,IN} = H_{FG,HRSG,OUT} + H_{BFW,EVAP,IN} + Q_{HL,ECO} \quad (113)$$



Obr. 21 Tepelná bilance ekonomizéru

Vstupní proudy bilance ekonomizéru tvoří:

- entalpie spalin na výstupu z výparníku $H_{FG,EVAP,OUT}$ (zároveň vyjadřující entalpii spalin na vstupu do ekonomizéru)
- entalpie vstupní napájecí vody do HRSG $H_{BFW,HRSG,IN}$ (současně vyjadřující entalpii napájecí vody na vstupu do ekonomizéru).

Mezi výstupní proudy bilance ekonomizéru patří:

- entalpie spalin na výstupu z HRSG $H_{FG,HRSG,OUT}$ (současně vyjadřující entalpii spalin na výstupu z ekonomizéru),
- entalpie napájecí vody na výstupu z ekonomizéru $H_{BFW,ECO,OUT}$ (zároveň vyjadřující entalpii napájecí vody na vstupu do výparníku),
- tepelné ztráty ekonomizéru $Q_{HL,ECO}$ závislé na součiniteli tepelných ztrát k_{HL} podle následující rovnice:

$$Q_{HL,ECO} = k_{HL} \cdot (H_{FG,EVAP,OUT} - H_{FG,HRSG,OUT}) \quad (114)$$

Entalpie spalin H_{FG} se určí jako součin jejich průtoku V_{FG} a měrné entalpie h_{FG} při dané teplotě:

$$H_{FG} = \dot{V}_{FG} \cdot h_{FG} \quad (115)$$

Entalpie napájecí vody H_{BFW} se určí pomocí součinu průtoku napájecí vody m_{BFW} a její měrné entalpie h_{BFW} :

$$H_{BFW} = \dot{m}_{BFW} \cdot h_{BFW} \quad (116)$$

Množství napájecí vody m_{BFW} je nutné zvětšit o velikost odľuhu vyjádřeného součinitelem odľuhu k_{BD} :

$$\dot{m}_{BFW} = \frac{\dot{m}_{STEAM}}{1 - k_{BD}} \quad (117)$$

Entalpie páry H_{STEAM} se určí pomocí součinu hmotnostního průtoku páry m_{STEAM} a její měrné entalpie h_{STEAM} :

$$H_{STEAM} = \dot{m}_{STEAM} \cdot h_{STEAM} \quad (118)$$

Dosazením a úpravou lze získat konstantu K vyjádřenou následujícím vztahem:

$$K = \frac{h_{FG,HRSG,IN} - h_{FG,EVAP,OUT}}{h_{FG,EVAP,OUT} - h_{FG,HRSG,OUT}} \quad (119)$$

Entalpie spalin na výstupu z výparníku $h_{FG,EVAP,OUT}$ lze pro zadanou výstupní teplotu spalin z HRSG potom vyjádřit pomocí konstanty K takto:

$$h_{FG,EVAP,OUT} = \frac{h_{FG,HRSG,IN} + K \cdot h_{FG,HRSG,OUT}}{K + 1} \quad (120)$$

Aby mohlo dojít k výrobě páry, musí být splněny následující nerovnosti:

$$T_{FG,EVAP,OUT} > T_{SAT} \quad (121)$$

$$T_{FG,HRSG,OUT} > T_{BFW,HRSG,IN} \quad (122)$$

Výkon ekonomizéru Q_{ECO} se určí podle rovnice:

$$Q_{ECO} = \dot{m}_{BFW} \cdot (h_{BFW, EVAP, IN} - h_{BFW, HRSG, IN}) \quad (123)$$

Výkon výparníku Q_{EVAP} se stanoví pomocí následujícího vztahu:

$$Q_{EVAP} = \dot{m}_{STEAM} \cdot \left(\frac{h_{BFW, SAT} - h_{BFW, EVAP, IN}}{1 - k_{BD}} + h_{STEAM, SAT} - h_{BFW, SAT} \right) \quad (124)$$

Výkon přehříváku Q_{SUP} vychází z rovnice:

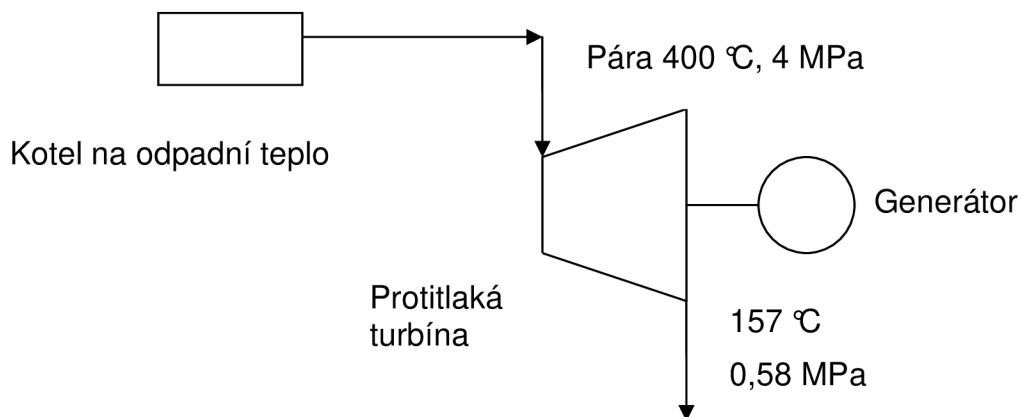
$$Q_{SUP} = \dot{m}_{STEAM} \cdot (h_{STEAM, HRSG, OUT} - h_{STEAM, SAT}) \quad (125)$$

Termická účinnost kotle η_T se stanoví na základě znalosti výkonů jednotlivých sekcí jako podíl využitě tepelné energie a entalpie spalín na vstupu do HRSG $H_{FG, HRSG, IN}$:

$$\eta_T = \frac{Q_{ECO} + Q_{EVAP} + Q_{SUP}}{H_{FG, HRSG, IN}} \quad (126)$$

6.6 Parní turbína

Parní turbína je tepelný stroj, který využívá expanzi páry k přeměně tepelné energie na energii mechanickou. Obvykle plní funkci pohonu elektrických generátorů. Zařazením turbíny za kotel na odpadní teplo (obr. 22) vznikne kogenerační systém, jenž dodává elektrickou energii a teplo. Běžně se využívají protitlaké, kondenzační a odběrové turbíny. Stanovení stavových veličin páry se provádí zjištěním hodnot z parních tabulek. Pro tento případ kogenerační jednotky byl zvolen typ protitlaké turbíny, kdy expanzní práce páry slouží ke generování elektrické energie.



Obr. 22 Schéma části procesu s turbínou

Efektivní změna entalpie Δh_{ef} se určí jako součin vnitřní účinnosti turbíny η_I a izoentropické změny entalpie Δh_I :

$$\Delta h_{ef} = \eta_I \cdot \Delta h_I \quad (127)$$

Elektrický výkon turbíny W_{EL} je dán součinem hmotnostního průtoku páry turbínou $\dot{m}_{páry, t}$, účinnosti generátoru η_G a efektivní změny entalpie Δh_{ef} :

$$W_{EL} = \dot{m}_{páry, t} \cdot \eta_G \cdot \Delta h_{ef} \quad (128)$$

7 Výsledky

Tato část práce bilancuje čtyři varianty sušení a následného spalování kalů z ÚČOV Praha. Bilance jsou provedeny pro výhledovou produkci kalů, která se předpokládá po rekonstrukci vodní linky čistírny [34].

7.1 Varianty procesů

Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, odvodněný čistírenský kal není vhodný k přímému spalování, protože má velmi nízkou výhřevnost. Pro zlepšení celkové energetické bilance procesu je tedy vhodné jeho vysušení.

K vlastnímu sušení je možné využít jednak teplo spalin vznikajících při spalování kalu, dále může být kal sušen s použitím zemního plynu. V takovém případě je pak možno využít teplo spalin ze spalování kalu k výrobě elektrické energie a tepla. Proto jsou bilancovány varianty, které jsou pro přehlednost v následujícím textu značeny takto:

- Varianta A – spalování kalu s využitím tepla spalin pro ohřev vzduchu jako sušícího média sušárny.
- Varianta B – spalování kalu s využitím tepla spalin pro ohřev termooleje jako sušícího média sušárny.
- Varianta C – spalování kalu s využitím tepla spalin pro výrobu elektrické energie a ohřev vzduchu jako sušícího média sušárny zemním plynem.
- Varianta D – spalování kalu s využitím tepla spalin pro výrobu elektrické energie a ohřev termooleje jako sušícího média sušárny zemním plynem.

Pro všechny varianty platí stejné vstupní množství sušiny, které vychází z udaného množství sušiny 155 t d^{-1} [34], což činí v přepočtu $6458,3 \text{ kg h}^{-1}$.

7.2 Bilance spalování kalu

Bilance spalování kalu vychází ze vzorců uvedených v kapitole 6.1, do kterých jsou dosazeny následující vstupní parametry uzlu, vstupní teplota spalovacího vzduchu $20 \text{ }^\circ\text{C}$, obsah sušiny v kalu 80% a ztráta žíháním $0,695$.

Součinitel přebytku vzduchu je volen $1,5$ pro roštové ohniště [35].

Složení vlhkého vzduchu je vypočteno na základě rovnice (17) ze složení suchého vzduchu (tab. 3):

Složka vzduchu	Objemové koncentrace suchého vzduchu (% obj.)	Objemové koncentrace vlhkého vzduchu (% obj.)
N ₂	78,03	77,10
Ar	0,95	0,94
CO ₂	0,03	0,03
O ₂	20,99	20,74
H ₂ O	0	1,19

Tab. 3 Složení vzduchu

Složení kalu a elementární složení hořlaviny vychází z následující tab. 4 a tab. 5:

Složení kalu	Hmotnostní koncentrace (%hm.)
Obsah hořlaviny	55,6
Obsah vody	20,0
Obsah popelovin	24,4

Tab. 4 Složení kalu

Složení hořlaviny	Hmotnostní koncentrace (%hm.)
C	60,15
H	6,51
N	24,84
O	8,35
S	0,10
Cl	0,05

Tab. 5 Elementární složení hořlaviny kalu

Pro zadané vstupní parametry byla na základě rovnic z kapitoly 6.1 vypočtena teplota spalin $1\,399\text{ °C}$ a objemový průtok spalin $51\,476\text{ m}_N^3\text{ h}^{-1}$. Entalpie spalin při této teplotě je $2\,203\text{ kJ m}_N^{-3}$.

Spaliny vzniklé spalováním kalu mají příliš vysokou teplotu, která by způsobila tavení popela a nepřiměřené namáhání vyzdívky kotle, proto je nutné z technologického hlediska ochladit spaliny na teplotu 1100 °C . Entalpie spalin při této teplotě činí $1686\text{ m}_N^3\text{ h}^{-1}$. Chlazení může být řešeno např. umístěním trubkových hadů na stěny kotle, které mohou být součástí kotle na odpadní teplo. Konečná teplota spalin 220 °C je volena s ohledem na technologické požadavky při jejich čištění. Objemové koncentrace vlhkých spalin jsou přepočítány na objemové koncentrace suchých spalin dle následující tab. 6:

Složka spalin	Koncentrace vlhkých spalin (%obj.)	Koncentrace suchých spalin (%obj.)
N ₂	71,10	80,81
Ar	0,84	0,96
CO ₂	9,82	11,16
O ₂	6,22	7,07
H ₂ O	12,02	0,00
SO ₂	0,01	0,01
HCl	0,00	0,00

Tab. 6 Přepočet objemových koncentrací vlhkých spalin na suché spaliny

Spalováním kalu dochází k uvolnění tepla ve výši 71,21 GJ/h. Toto teplo může být využito k sušení kalu nebo k výrobě elektrické energie dle výše uvedených variant.

7.3 Bilance sušení vzduchem

Vztahy, které byly použity pro výpočty bilance sušení vzduchem, vychází z kapitoly 6.3. Mezi vstupní parametry patří obsah vstupní sušiny v kalu 30 % a obsah výstupní sušiny 80 %. Pracovní tlak sušárny 98 kPa je volen v oblasti mírného podtlaku z důvodu eliminace pachových emisí.

Pro sušení je uvažován vzduch o vstupní teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50 %. Po konzultaci s vedoucí práce byly zvoleny parametry výstupního vzduchu: teplota 40 °C a relativní vlhkost 80 %.

Pro uvedené vstupní parametry byla vypočtena teplota vzduchu v sušárně 107,7 °C. Pro vysušení kalu na požadované parametry je třeba dodat 52,5 GJ h⁻¹ tepla při hmotnostním průtoku suchého vzduchu 416 t h⁻¹.

Hmotnostní a tepelná bilance pro jednotlivé vstupní a výstupní proudy dle obr. 18 je uvedena v následující tab. 7 a tab. 8:

Proud	1	2	3	4	5
Vzduch (t h ⁻¹)	416,04	416,04	416,04	0,00	0,00
Voda (t h ⁻¹)	3,11	3,11	16,57	15,07	1,61
Sušina (t h ⁻¹)	0,00	0,00	0,00	6,46	6,46

Tab. 7 Hmotnostní bilance sušárny se vzduchem

Tepelná bilance		Teplo (GJ/h ⁻¹)
Vstupní proudy	Teplo dodané vzduchem (proud 1)	11,96
	Teplo dodané ohřevem vzduchu	52,50
Výstupní proudy	Teplo na odpaření vody	33,01
	Teplo na ohřátí kalu	6,67
	Teplo odnesené vzduchem (proud 3)	24,78

Tab. 8 Tepelná bilance sušárny se vzduchem

7.4 Bilance sušení pomocí termooleje

Vzorce, které byly použity pro výpočty v tomto technologickém uzlu, vychází z kapitoly 6.4. Mezi vstupní parametry se řadí obsah vstupní sušiny v kalu 30 % a obsah výstupní sušiny 80 %.

Střední měrná tepelná kapacita termooleje vychází z tabelovaných dat [33] a dosahuje hodnoty 2,94 kJ kg⁻¹ K⁻¹.

V sušárně je kal sušen při teplotě 105 °C. Vstupní teplota termooleje dosahuje hodnoty 210 °C, výstupní teplota je 105 °C. Hmotnostní průtok termooleje 127,8 t h⁻¹ je pro splnění energetických požadavků sušárny třeba dodat teplo 39,5 GJ h⁻¹. Hmotnostní a tepelná bilance je uvedena v následující tab. 9 a tab. 10:

Hmotnostní bilance	Hmotnostní tok ($t\ h^{-1}$)
Množství sušiny	6,46
Množství vody ve vstupním proudu kalu	15,07
Množství sušiny a vody ve vstupním proudu kalu	21,53
Množství vody ve výstupním proudu kalu	1,61
Množství sušiny a vody ve výstupním proudu kalu	8,07
Množství odpařené vody	13,45

Tab. 9 Hmotnostní bilance sušárny s termoolejem

Tepelná bilance	Teplo ($GJ\ h^{-1}$)
Teplo přivedené termoolejem	39,48
Teplo na odpaření vody z kalu	33,02
Teplo na ohřátí celku (sušina + voda) kalu	6,46

Tab. 10 Tepelná bilance sušárny s termoolejem

7.5 Bilance spalování zemního plynu

Spalování zemního plynu je součástí varianty C a D. Bilance spalování zemního plynu vychází ze vzorců uvedených v kapitole 6.2. Zemní plyn má složení a výhřevnost dle následující tab. 11:

Složka ZP	Koncentrace (%obj.)	Výhřevnost (kJ/m_N^3)
CH ₄	98.24	35781.00
C ₂ H ₆	0.59	63687.00
C ₃ H ₈	0.17	91176.00
C ₄ H ₁₀	0.07	118584.02
C ₅ H ₁₂	0.02	145957.39
C ₆ H ₁₄	0.01	173458.00
N ₂	0.83	0.00
CO ₂	0.07	0.00

Tab. 11 Složení zemního plynu a výhřevnost jeho jednotlivých složek

Jeho nákupní cena je na základě dostupných informací volena 700 Kč za 1 MWh neboli po přepočtu 7,35 Kč za 1 m³.

Součinitel přebytku vzduchu α je zvolen dle [32] o hodnotě 1,1 pro spalování topných plynů. Složení spalovacího vzduchu je shodné jako u spalování kalu.

Objemový průtok spalovaného zemního plynu závisí na potřebách typu sušárny. Spaliny dosahují teploty 1 893 °C, jejich entalpie při této teplotě je 3 107 kJ/m_N³. Vzniklé spaliny je nutno ochladit z technologického důvodu na 1200 °C, aby jejich příliš vysoká teplota nenamáhala vyzdívkou kotle. Konečná teplota spalin

před vstupem do komína je 150 °C. Odejmuté teplo je využito na ohřev vzduchu ve variantě C nebo na ohřev termooleje ve variantě D.

Pro variantu C dosahuje objemový průtok plynu hodnoty 2 720 m_N³ h⁻¹. Spaliny mají objemový průtok 31 604 m_N³ h⁻¹. Roční náklady na zemní plyn činí 175,13 mil. Kč.

Pro variantu D dosahuje objemový průtok plynu hodnoty 2 045 m_N³ h⁻¹. Spaliny mají objemový průtok 23 763 m_N³ h⁻¹. Roční náklady na zemní plyn činí 131,68 mil. Kč.

7.6 Ekonomické srovnání jednotlivých variant

Dle vzorců uvedených v kapitole 6.5 a 6.6 zařazením kotle na odpadní teplo a protitlaké turbíny lze obdržet 2,05 MW elektrické energie.

Biopaliva vyrobená z kalů z čistíren odpadních vod se řadí do kategorie O2 čisté biomasy [36], pro kterou je vyčíslena výkupní cena elektrické energie dodané do sítě 3 270 Kč za 1 MWh [37]. Roční zisk prodejem elektrické energie získané spalováním kalů výše uvedených parametrů, která bude dodána do sítě, činí 58,77 mil. Kč/rok.

Tab. 12 zobrazuje přehled energetických nároků jednotlivých variant a roční náklady na zemní plyn a zisk z prodeje elektrické energie.

A	Energetické nároky sušárny se vzduchem	52,50	GJ h ⁻¹
	Teplo dodané spaliny	71,21	GJ h ⁻¹
	Využitelný přebytek tepla ze spalin	18,71	GJ h ⁻¹
B	Energetické nároky sušárny s termoolejem	39,48	GJ h ⁻¹
	Teplo dodané spaliny	71,21	GJ h ⁻¹
	Využitelný přebytek tepla ze spalin	31,73	GJ h ⁻¹
C	Energetické nároky sušárny se vzduchem	52,50	GJ h ⁻¹
	Množství ZP nutné k ohřátí vzduchu	2720,00	m _N ³ h ⁻¹
	Roční náklady na spotřebu zemního plynu	175,13	mil. Kč/rok
	Roční zisk výrobou elektrické energie	58,77	mil. Kč/rok
	Ztráta	116,36	mil. Kč/rok
D	Energetické nároky sušárny s termoolejem	39,48	GJ h ⁻¹
	Množství ZP nutné k ohřátí termooleje	2045,20	m _N ³ h ⁻¹
	Roční náklady na spotřebu zemního plynu	131,68	mil. Kč/rok
	Roční zisk výrobou elektrické energie	58,77	mil. Kč/rok
	Ztráta	72,91	mil. Kč/rok

Tab. 12 Přehled energetických nároků jednotlivých variant procesů

8 Závěr

Spalování odvodněného a vysušeného surového směsného kalu je jednou z možností finálního nakládání s kaly. Tato technologie je nejen ověřena výsledky zkoušek na laboratorní úrovni, ale také výbornými praktickými zkušenostmi z celé Evropy. Při spalování čistírenských kalů dochází k redukci jejich hmotnosti a objemu, vítanou vlastností je také hygienizace.

Spalování má navíc ještě další pozitivní vlastnost, kvůli které se stává preferovanou záležitostí. Čistírenské kaly obsahují energii, kterou lze spalováním využít k výrobě elektrické energie. Toto ekonomické hledisko je dnes nezanedbatelným faktorem při rozhodování o způsobu nakládání s kaly.

Nevýhodou spalování odvodněných kalů je velmi vysoká energetická náročnost. Kal určený ke spalování je proto nutné nejprve vysušit. Pro pokrytí energetických požadavků sušáren lze použít odpadní teplo spalin ze spalování kalů. Toto vzájemné propojení technologií bude mnohem ekonomicky výhodnější než jejich případný oddělený provoz.

Z provedených bilancí spalování sušeného kalu vyplývá, že energii ve spalinách je výhodnější využít pro vlastní sušení kalu. V případě využití veškeré energie spalin na výrobu elektrické energie je nutné využít k sušení kalu zemní plyn. Zisk z prodeje vyrobené elektrické energie nedosahuje ani poloviny nákladů na spalovaný zemní plyn určený pro pokrytí energetických požadavků sušáren.

Z uvažovaných sušáren se jeví jako výhodnější použití sušárny s termoolejem, protože její energetické nároky činí $39,48 \text{ GJ h}^{-1}$ oproti $52,50 \text{ GJ h}^{-1}$ vzduchové sušárny.

Při využití termoolejové sušárny je v systému přebytek energie $31,73 \text{ GJ h}^{-1}$, který lze dále využít.

V rámci práce nejsou uvažovány investiční náklady, jsou zahrnuty pouze energetické požadavky procesních médií.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] Nařízení vlády 185/2001 Sb. [online] 2008, [cit. 12. 4. 2008]. Dostupné z [www: http://www.mvcr.cz/sbirka/2005/sb033-05.pdf](http://www.mvcr.cz/sbirka/2005/sb033-05.pdf)
- [2] Ing. Vladimír Pytl a kolektiv – Příručka provozovatele čistírny odpadních vod – 1. vydání, Praha 2004, 209 s., ISBN 80-239-2528-8.
- [3] Brněnské vodárny a kanalizace, a. s. – Čistírna odpadních vod v Modřicích. [online] 2008, poslední revize 2005, [cit. 12. 4. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.bvk.cz/page.jsp?lang=cz&firstLevel=29&secondLevel=43&thirdLevel=45>](http://www.bvk.cz/page.jsp?lang=cz&firstLevel=29&secondLevel=43&thirdLevel=45).
- [4] VŠCHT v Praze, Ústav technologie vody a prostředí – Uspořádání technologické linky ČOV. [online] 2008, [cit. 23. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://web.vscht.cz/starad/Uspo%5%99%3%a1d%3%a1n%3%ad%20technologick%3%a9%20linky%20%4%8cOV.ppt>](http://web.vscht.cz/starad/Uspo%5%99%3%a1d%3%a1n%3%ad%20technologick%3%a9%20linky%20%4%8cOV.ppt).
- [5] VŠCHT v Praze, Ústav technologie vody a prostředí – Odpadní vody. [online] 2008, [cit. 23. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://martinpublic.webz.cz/06odpadni.pps>](http://martinpublic.webz.cz/06odpadni.pps).
- [6] Doc. Ing. Pavel Hoffman CSc., Ústav procesní a zpracovatelské techniky, ČVUT v Praze, materiály ke studiu předmětu ČOVPE, část čištění odpadních vod, Schéma ÚČOV Praha. [online] 2008, [cit. 17. 5. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.fsid.cvut.cz/cz/u218/peoples/hoffman/PREDMETY/COVP/COV/COV%20Troja/UCOV%20Troja2.jpg>](http://www.fsid.cvut.cz/cz/u218/peoples/hoffman/PREDMETY/COVP/COV/COV%20Troja/UCOV%20Troja2.jpg).
- [7] VŠCHT v Praze, Ústav technologie vody a prostředí – Aktivovaný kal. [online] 2008, [cit. 23. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://web.vscht.cz/pecenkam/Biologick%3%a9%20%4%8di%5%a1t%4%9bn%3%ad%20OV/Slo%5%been%3%ad%20AK%20a%20kvantifikace%20separace-B%4%8cOV-2006-7.pdf>](http://web.vscht.cz/pecenkam/Biologick%3%a9%20%4%8di%5%a1t%4%9bn%3%ad%20OV/Slo%5%been%3%ad%20AK%20a%20kvantifikace%20separace-B%4%8cOV-2006-7.pdf).
- [8] Prof. Ing. Jana Zábranská, CSc. – Anaerobní rozklad bioodpadů - Získávání energie z obnovitelných zdrojů. VŠCHT v Praze, Ústav technologie vody a prostředí. [online] 2008, [cit. 10. 5. 2008]. Dostupné z [www: <http://web.vscht.cz/starad/anaerobn%3%ad%20%4%8di%5%a1t%4%9bn%3%ad.ppt>](http://web.vscht.cz/starad/anaerobn%3%ad%20%4%8di%5%a1t%4%9bn%3%ad.ppt).
- [9] Olga Procházková, Markéta Grycmanová, Pavel Kolat, Lukáš Pilař – Čistírenské kaly zpracované metodou termické analýzy, sborník příspěvků ze semináře Energie z biomasy VII, VUT v Brně. ISBN 80-214-3310-8. [online] 2008, [cit. 11. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf>](http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf).
- [10] Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC), Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách, Běžné čištění odpadních vod a odpadních plynů, Systémy managementu v chemickém průmyslu, překlad originálu z února 2002. [online] 2008, [cit. 4. 5. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.ippc.cz/soubory/vodaaplyn/vodaaplyn.html>](http://www.ippc.cz/soubory/vodaaplyn/vodaaplyn.html).

- [11] VŠCHT v Praze, Ústav technologie vody a prostředí – Stabilizace kalů [online] 2008, [cit. 22. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://web.vscht.cz/starad/Kal%5b1%5d.hosp.5.Stabilizace.biolog..ppt>](http://web.vscht.cz/starad/Kal%5b1%5d.hosp.5.Stabilizace.biolog..ppt).
- [12] VŠCHT v Praze, Ústav technologie vody a prostředí – Kalové hospodářství čistíren odpadních vod. [online] 2008, [cit. 11. 1. 2008]. Dostupné z [www: <http://web.vscht.cz/starad/COV_Skripta_Kal_hosp.doc>](http://web.vscht.cz/starad/COV_Skripta_Kal_hosp.doc).
- [13] Michal Dohányos – Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. Biom.cz [online] 2006-05-09, [cit. 23. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://biom.cz/clanky.stm?x=1888405>](http://biom.cz/clanky.stm?x=1888405). ISSN 1801-2655
- [14] Michaela Budňáková – Využití odpadů v zemědělství. [online] 2008, [cit. 26. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://biom.cz/index.shtml?x=546892>](http://biom.cz/index.shtml?x=546892).
- [15] Český statistický úřad - Hlavní město Praha – Produkce kalů a způsob jejich zneškodnění v ČOV podle krajů v roce 2006. [online] 2008, [cit. 4. 5. 2008]. Dostupné z [www: http://www.czso.cz/xa/edicniplan.nsf/t/9500470D80/\\$File/13-1101070231.xls](http://www.czso.cz/xa/edicniplan.nsf/t/9500470D80/$File/13-1101070231.xls).
- [16] Jaroslav Váňa a Miloslav Mezuliánik – Nové perspektivy výroby průmyslových kompostů v České republice. [online] 2008, [cit. 26. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://stary.biom.cz/mag/6.html>](http://stary.biom.cz/mag/6.html).
- [17] Markéta Grycmanová, Olga Procházková, Pavel Kolat – Sušení biomasy v rotační sušárně, sborník příspěvků ze semináře Energie z biomasy VII, VUT v Brně ISBN 80-214-3310-8. [online] 2008, [cit. 11. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf>](http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf).
- [18] Tadeáš Ochodek, Jan Koloničný, Pavel Janásek – VŠB Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum – Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy, [online] 2008, [cit. 11. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/bio.pdf>](http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/bio.pdf).
- [19] Petr Pekárek, Pavel Machač, Václav Koza, Kateřina Bradáčová – Adsorpční čištění generátorového plynu, sborník příspěvků ze semináře Energie z biomasy VII, VUT v Brně ISBN 80-214-3310-8. [online] 2008, [cit. 11. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf>](http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf).
- [20] Martin Lisý, Marek Baláš, Jiří Moskalík, Přemysl Kohout, Zdeněk Skála – Možnosti fluidního zplyňování biomasy pro kogeneraci, sborník příspěvků ze semináře Energie z biomasy VII, VUT v Brně. ISBN 80-214-3310-8. [online] 2008, [cit. 11. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf>](http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf).
- [21] Kalové hospodářství Libereckého kraje – Realizační program Plánu odpadového hospodářství Libereckého kraje – [online] 2008, [cit. 11. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.kraj-lbc.cz/public/ozivpr/realizacni_program_kh_lk_6af0ffdfc9.pdf>](http://www.kraj-lbc.cz/public/ozivpr/realizacni_program_kh_lk_6af0ffdfc9.pdf).
- [22] Patrik Janota – Mytí dopravních prostředků a zpracování odpadních vod z této činnosti. [online] 2008, [cit. 11. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://envi.upce.cz/pisprace/ks_pce/Janota.doc>](http://envi.upce.cz/pisprace/ks_pce/Janota.doc).
- [23] Peger Geffert, Jarmila Geffertová – Energetické využívání odpadů – fikce či realita?, sborník příspěvků ze semináře Energie z biomasy VII, VUT v Brně

- ISBN 80-214-3310-8. [online] 2008, [cit. 11. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf>](http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_vii/papers/enbio-vii.pdf).
- [24] Andritz – Environment & Process Technologies, Belt drying system. [online] 2008, [cit. 14. 2. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.andritz.com/ANONIDZ0D30922F29DBC360/ep-thermal-bds>](http://www.andritz.com/ANONIDZ0D30922F29DBC360/ep-thermal-bds).
- [25] Elektronický odborný časopis Voda 2/2007 [online] 2008, [cit. 11. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.e-voda.cz/uploads/assets/casopisy/voda-2007-10.pdf>](http://www.e-voda.cz/uploads/assets/casopisy/voda-2007-10.pdf), ISSN 1801-5794.
- [26] Brněnské vodárny a kanalizace, a. s. – ČOV Modřice – Technický popis. [online] 2008, poslední revize 2005, [cit. 12. 4. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.bvk.cz/ipublisher/files/COV%20Modrice%20-20technicky%20popis.pdf?show=dbfil&id=102>](http://www.bvk.cz/ipublisher/files/COV%20Modrice%20-20technicky%20popis.pdf?show=dbfil&id=102).
- [27] Odpadové forum – článek Spalovny? – Bez obav! [online] 2008, [cit. 25. 3. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.odpadoveforum.cz/prilohy/Priloha1.pdf>](http://www.odpadoveforum.cz/prilohy/Priloha1.pdf).
- [28] Prof. Ing. Karel Obroučka, CSc. – Termické odstraňování a energetické využívání odpadů, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2003, dotisk 1. vydání, 143 s., ISBN 80-248-0009-8.
- [29] Sbírka zákonů 354/2002, [online] 2008, [cit. 4. 5. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.mvcr.cz/sbirka/2002/sb127-02.pdf>](http://www.mvcr.cz/sbirka/2002/sb127-02.pdf).
- [30] Integrovaná prevence a omezování znečištění, Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů, červenec 2005. 749 s. [online] 2008, [cit. 10. 5. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/CENMSFLZ7EX4/\\$FILE/Spalov%C3%A1n%C3%AD%20odpad%C5%AF.pdf>](http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/CENMSFLZ7EX4/$FILE/Spalov%C3%A1n%C3%AD%20odpad%C5%AF.pdf).
- [31] Doc. Ing. František Babinec, CSc. – Aplikovaná fyzikální chemie, Nakladatelství VUT Brno 1991, 1. vydání, 200 s. ISBN 80-214-0367-5.
- [32] Prof. Ing. Michal Dohányos, CSc., Ústav technologie vody a prostředí VŠCHT Praha – Porovnání energetické bilance spalování kalů a anaerobní stabilizace, článek z konference Spalování kalů z čistíren odpadních vod, vydala Asociace čistírenských expertů ČR, září 2003, 84 s., ISBN 80-239-1380-8
- [33] Doc. Ing. Jiří Šesták, CSc. a kol. – Transportní a termodynamická data pro výpočet aparátů a strojního zařízení, ČVUT v Praze, Praha 1981, dotisk, 245 s.
- [34] Karel Sýkora, Miroslav Sedláček, Jiří Kinkor, Marie Michalová, Jiří Čejka, Vladimíra Gaierová – Hodnocení technologických, energetických, ekologických a provozních hledisek pro výhledové hospodaření s kaly na ÚČOV Praha, článek z konference Kaly a odpady 2008, vydala Asociácia čistiarenských expertov SR, 2008. ISBN 978-80-89088-62-1
- [35] Kolektiv autorů – Strojírenská příručka, svazek 4, 254 s. 1. vydání. Scientia, ISBN 80-85827-58-1.
- [36] Sbírka zákonů č. 482/2005 – Vyhláška o stanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy. [online] 2008, [cit. 4. 5. 2008]. Dostupné z [www: <http://www.mvcr.cz/sbirka/2005/sb168-05.pdf>](http://www.mvcr.cz/sbirka/2005/sb168-05.pdf).

- [37] Ing. Josef Fiřt – Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2007 ze dne 20. listopadu 2007, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů. [online] 2008, [cit. 4. 5. 2008]. Dostupné z www: <http://www.tzb-info.cz/download.py?file=docu/predpisy/download/CR7-2007.pdf>.

10 Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ASK	anaerobně stabilizovaný kal
ČOV	čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika
EO	ekvivalentní obyvatel
EU	Evropská unie
HRSK	kotel na odpadní teplo
NO _x	oxidy dusíku
SSK	směsný surový kal
ÚČOV	Ústřední čistírna odpadních vod

11 Seznam použitých symbolů

<i>symbol</i>	význam	jednotka
<i>AntA</i>	koeficient Antoineovy rovnice	-
<i>AntB</i>	koeficient Antoineovy rovnice	-
<i>AntC</i>	koeficient Antoineovy rovnice	-
<i>C_h</i>	obsah uhlíku v hořlavíně	hm%
<i>Cl_h</i>	obsah chloru v hořlavíně	hm%
<i>C_{p,k}</i>	měrná tepelná kapacita kalu	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,k,in}</i>	měrná tepelná kapacita kalu na vstupu do sušárny	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,k,out}</i>	měrná tepelná kapacita kalu na výstupu ze sušárny	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,k,prům}</i>	průměrná měrná tepelná kapacita kalu	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,o}</i>	měrná tepelná kapacita termooleje	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,o,in}</i>	měrná tepelná kapacita termooleje při vstupní teplotě	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,o,out}</i>	měrná tepelná kapacita termooleje při výstupní teplotě	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,o,stř}</i>	střední měrná tepelná kapacita termooleje	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,p}</i>	měrná tepelná kapacita paliva	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,sp}</i>	měrná tepelná kapacita spalin	$\text{kJ m}_N^{-3} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,suš}</i>	měrná tepelná kapacita sušiny	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,vz}</i>	měrná tepelnou kapacita vzduchu	$\text{kJ m}_N^{-3} \text{K}^{-1}$
<i>C_{p,w}</i>	měrná tepelná kapacita vody	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>D_{in}</i>	vstupní hodnota sušiny do sušárny	%
<i>D_{out}</i>	výstupní hodnota sušiny do sušárny	%
<i>h''_s</i>	entalpie sušiny vysušeného kalu	kJ kg^{-1}
<i>h''_w</i>	entalpie vody ve vysušeném kalu	kJ kg^{-1}
<i>h'_s</i>	entalpie sušiny vlhkého kalu	kJ kg^{-1}
<i>h'_w</i>	entalpie vody ve vlhkém kalu	kJ kg^{-1}
<i>h₁</i>	entalpie vstupujícího proudu sušícího vzduchu	kJ m_N^{-3}
<i>h₃</i>	entalpie vystupujícího proudu sušícího vzduchu	kJ m_N^{-3}
<i>h_{BFW}</i>	měrná entalpie napájecí vody	kJ kg^{-1}
<i>H_{BFW}</i>	entalpie napájecí vody	kJ h^{-1}
<i>H_{BFW,EVAP,IN}</i>	entalpie napájecí vody na vstupu do výparníku	kJ h^{-1}
<i>H_{BFW,HRSG,IN}</i>	entalpie napájecí vody na vstupu do HRSG	kJ h^{-1}
<i>h_{BFW,HRSG,OUT}</i>	entalpie napájecí vody na výstupu z HRSG	kJ kg^{-1}

h_{FG}	měrná entalpie spalin	kJ m_N^{-3}
H_{FG}	entalpie spalin	kJ h^{-1}
$H_{FG,EVAP,OUT}$	entalpie spalin na výstupu z výparníku	kJ h^{-1}
$H_{FG,HRSG,IN}$	entalpie spalin na vstupu do HRSG	kJ h^{-1}
$H_{FG,HRSG,OUT}$	entalpie spalin na výstupu z HRSG	kJ h^{-1}
H_h	obsah vodíku v hořlavíně	hm%
H_{HCl}	spotřeba vodíku na vznik chlorovodíku	$\text{kg H kg}^{-1} \text{Cl}$
HHV	spalné teplo	kJ kg^{-1}
HHV_h	spalné teplo pro 100% hořlavinu	kJ kg^{-1}
$HHV_{h,prům}$	průměr spalných tepel hořlaviny	kJ kg^{-1}
HHV_p	spalné teplo paliva	kJ kg^{-1}
$h_{i,vzduch}$	měrná entalpie složky směsi vzduchu	kJ m_N^{-3}
$h_{i,ZP}$	měrná entalpie složky zemního plynu	kJ m_N^{-3}
$h_{sp,ZP}$	měrná entalpie spalin ze spalování zemního plynu	kJ m_N^{-3}
h_{STEAM}	měrná entalpie páry	kJ m_N^{-3}
H_{STEAM}	entalpie páry	kJ h^{-1}
$H_{STEAM,HRSG,OUT}$	entalpie páry na výstupu z HRSG	kJ h^{-1}
h_{vzduch}	měrná entalpie vzduchu	kJ h^{-1}
H_{vzduch}	entalpie vzduchu	kJ h^{-1}
h_{ZP}	měrná entalpie zemního plynu	kJ m_N^{-3}
K	konstanta HRSG	-
k_{BD}	součinitel odluhu	-
k_{HL}	součinitel tepelných ztrát	-
K_i	konstanta výpočtu entalpie vzduchu při spalování kalu	-
LHV	výhřevnost	kJ kg^{-1}
$LHV_{i,ZP}$	výhřevnost složky zemního plynu	kJ kg^{-1}
LHV_{ZP}	výhřevnost zemního plynu	kJ kg^{-1}
L_i	konstanta výpočtu entalpie vzduchu při spalování kalu	-
m_a	hmotnost popela	kg
m_{BFW}	průtok napájecí vody	kg s^{-1}
m_h	hmotnost hořlaviny	kg
M_i	konstanta výpočtu entalpie vzduchu při spalování kalu	-
m_o	hmotnostní tok termooleje	kg h^{-1}
m_p	hmotnost paliva	kg

$m_{páry,t}$	hmotnostní průtok páry turbínou	kg h ⁻¹
$m_{páry}$	hmotnost páry	kg
m_s	hmotnost sušiny	kg
$m_{suš}$	hmotnostní tok sušiny	kg h ⁻¹
$m_{s.v.}$	hmotnost suchého vzduchu	kg
m_{STEAM}	hmotnostní průtok páry	kg s ⁻¹
m_{vz}	hmotnostní průtok sušícího vzduchu	kg h ⁻¹
m'_w	hmotnostní tok vody ve vlhkém kalu	kg h ⁻¹
m''_w	hmotnostní tok vody ve vysušeném kalu	kg h ⁻¹
$m_{w,1}$	hmotnostní tok vody v proudu vzduchu 1	kg h ⁻¹
$m_{w,2}$	hmotnostní tok vody v proudu vzduchu 2	kg h ⁻¹
$m_{w,3}$	hmotnostní tok vody v proudu vzduchu 3	kg h ⁻¹
$m_{w,1kg\ vzduch}$	množství vody pohlcené kilogramem vzduchu	kg
$m_{w,odpař,suš.t.}$	množství odpařené vody v sušárně s termoolejem	kg h ⁻¹
$m_{w,odpař,suš.v.}$	množství odpařené vody v sušárně se vzduchem	kg h ⁻¹
MW_C	molární hmotnost uhlíku	kmol kg ⁻¹
MW_{Cl}	molární hmotnost chloru	kmol kg ⁻¹
MW_H	molární hmotnost vodíku	kmol kg ⁻¹
MW_O	molární hmotnost kyslíku	kmol kg ⁻¹
MW_S	molární hmotnost síry	kmol kg ⁻¹
N_i	konstanta výpočtu entalpie vzduchu při spalování kalu	-
O_h	obsah kyslíku v hořlavině	hm%
O_i	konstanta výpočtu entalpie vzduchu při spalování kalu	-
p	tlak vzduchu	Pa
p^0	tlaku nasycených par	Pa
P_i	konstanta výpočtu entalpie zemního plynu	-
p_p''	tlak nasycených par	Pa
$p_{suš}$	tlak v sušárně	Pa
Q_{BD}	tepelné ztráty odluhem	kJ h ⁻¹
Q_{dis}	disociační teplo	kJ
Q_{ECO}	výkon ekonomizéru	kJ h ⁻¹
Q_{EVAP}	výkon výparníku	kJ h ⁻¹
$Q_{HL,ECO}$	tepelné ztráty ekonomizéru	kJ h ⁻¹
$Q_{HL,EVAP+SUP}$	tepelné ztráty výparníku a přehříváku	kJ h ⁻¹

Q_{ch}	chemické teplo	kJ
Q_k	teplo na ohřátí kalu	kJ kg ⁻¹
Q_{kap}	teplo přijaté kapalinou	kJ kg ⁻¹
Q_{ned}	teplo nedopalu	kJ
Q_o	teplo přivedené termoolejem	kJ kg ⁻¹
Q_p	teplo předeštěného paliva	kJ
$Q_{př}$	přídavné teplo	kJ kg ⁻¹
Q_{sp}	teplo spalin	kJ m _N ⁻³
Q_{SUP}	výkon přehříváku	kJ h ⁻¹
$Q_{suš}$	teplo nutné k ohřátí sušícího vzduchu	kJ h ⁻¹
Q_t	teplo odevzdané tuhým tělesem	kJ kg ⁻¹
Q_{vz}	teplo předeštěného vzduchu	kJ
Q_w	teplo na odpaření vody z kalu	kJ h ⁻¹
Q_z	ztrátové teplo	kJ
R_i	konstanta výpočtu entalpie zemního plynu	-
S_h	obsah síry v hořlavině	hm%
S_i	konstanta výpočtu entalpie zemního plynu	-
$t_{0,vzduch}$	teplota vzduchu 0	K
$t_{0,ZP}$	teplota 0 pro výpočet entalpie zemního plynu	K
$t_{1,vzduch}$	teplota vzduchu 1	K
$t_{1,ZP}$	teplota 1 pro výpočet entalpie zemního plynu	K
$t_{2,vzduch}$	teplota vzduchu 2	K
$t_{2,ZP}$	teplota 2 pro výpočet entalpie zemního plynu	K
$t_{3,vzduch}$	teplota vzduchu 3	K
$t_{3,ZP}$	teplota 3 pro výpočet entalpie zemního plynu	K
t_{ad}	adiabatická spalná teplota	°C
$T_{BFW,ECO,OUT}$	teplota napájecí vody na výstupu z ekonomizéru	°C
$T_{BFW,EVAP,IN}$	teplota napájecí vody na vstupu do výparníku	°C
$T_{BFW,HRSG,IN}$	teplota napájecí vody na vstupu do HRSG	°C
$T_{BFW,SUP,IN}$	teplota napájecí vody na vstupu do přehříváku	°C
$T_{FG,EVAP,IN}$	teplota spalin na vstupu do výparníku	°C
$T_{FG,EVAP,OUT}$	teplota spalin na výstupu z výparníku	°C
$T_{FG,HRSG,OUT}$	teplota spalin na výstupu z HRSG	°C
$T_{k,suš}$	teplota kalu v sušárně s termoolejem	°C

$T_{o,in}$	vstupní teplota termooleje	°C
$T_{o,out}$	výstupní teplota termooleje	°C
t_p	teplota paliva	°C
T_{SAT}	teplota sytosti napájecí vody	°C
t_{sp}	teplota spalin	°C
$t_{sp,prak}$	praktická spalná teplota	°C
$t_{sp,teor}$	teoretická spalná teplota	°C
t_{vz}	teplota vzduchu	°C
T_{vzduch}	termodynamická teplota vzduchu	K
T_{ZP}	termodynamická teplota zemního plynu	K
U_i	konstanta výpočtu entalpie zemního plynu	-
$V_{Ar,sp,kal}$	objem složky spalin ze spalování kalu - argon	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{Ar,sp,ZP}$	objem složky spalin ze spalování zemního plynu - argon	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{CO2,sp,kal}$	objem složky spalin ze spalování kalu - oxid uhličitý	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{CO2,sp,ZP}$	objem složky spalin ze spalování zemního plynu - oxid uhličitý	$m_N^3 m_N^{-3}$
V_{FG}	průtok spalin	$m_N^3 s^{-1}$
$V_{H2O,sp,kal}$	objem složky spalin ze spalování kalu - voda	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{H2O,sp,ZP}$	objem složky spalin ze spalování zemního plynu - voda	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{HCl,sp,kal}$	objem složky spalin ze spalování kalu - chlorovodík	$m_N^3 m_N^{-3}$
V_i	konstanta výpočtu entalpie plyné směsi ZP	-
$V_{i,sp,kal}$	objem složky spalin ze spalování kalu	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{i,sp,ZP}$	objem složky spalin ze spalování zemního plynu	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{i,vzduch,suš}$	objemová koncentrace složky sušícího vzduchu	%obj.
V_n	molární objem při normálních podmínkách	$m^3 kmol^{-1}$
$V_{N2,sp,kal}$	objem složky spalin ze spalování kalu - dusík	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{N2,sp,ZP}$	objem složky spalin ze spalování zemního plynu - dusík	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{O2,sp,kal}$	objem složky spalin ze spalování kalu - kyslík	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{O2,sp,ZP}$	objem složky spalin ze spalování zemního plynu - kyslík	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{O2,stech}$	stechiometrická spotřeba kyslíku	$m_N^3 O_2 m_N^{-3}$ paliva
$V_{SO2,sp,kal}$	objem složky spalin ze spalování kalu - oxid siřičitý	$m_N^3 m_N^{-3}$
V_{sp}	objem spalin	m_N^3

$V_{sp,celk,ZP}$	objemový průtok spalin	$m_N^3 h^{-1}$
$V_{sp,kal}$	celkový objem spalin ze spalování kalu	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{sp,min}$	objem spalin při stechiometrické spotřebě vzduchu	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{sp,ZP}$	celkový objem spalin ze spalování zemního plynu	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{suš.v.}$	průtok sušícího vzduchu	$kg h^{-1}$
V_{vzduch}	průtok vzduchu	$m_N^3 h^{-1}$
$V_{vzduch,celk,kal}$	celkové množství vzduchu pro spalování kalu	$m_N^3 h^{-1}$
$V_{vzduch,celk,ZP}$	celková spotřeba vzduchu při spalování zemního plynu	$m_N^3 h^{-1}$
$V_{vzduch,h}$	spotřeba vzduchu na spálení 1 kg hořlaviny	$m_N^3 kg^{-1}$ hořlaviny
$V_{vzduch,p}$	spotřeba vzduchu na spálení 1 kg paliva	$m_N^3 kg^{-1}$ paliva
$V_{vzduch,skut,ZP}$	skutečná spotřeba vzduchu při spalování zemního plynu	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{vzduch,teor,h}$	teoretická spotřeba vzduchu na 1 kg hořlaviny	$m_N^3 kg^{-1}$ hořlaviny
$V_{vzduch,teor,p}$	teoretická spotřeba vzduchu na 1 kg paliva	$m_N^3 kg^{-1}$ paliva
$V_{vzduch,teor,ZP}$	teoretická spotřeba vzduchu pro spalování ZP	$m_N^3 m_N^{-3}$
$V_{vzduch,min}$	minimální množství vzduchu	m_N^3
V_{ZP}	objemový průtok zemního plynu	$m_N^3 h^{-1}$
W_{celk}	množství celkové vody	$kg kg^{-1}$
W_{EL}	elektrický výkon	$kJ h^{-1}$
W_H	množství vody ze spalování vodíku	$kg kg^{-1}$
X_a	hmotnostní obsah popelovin v palivu	hm%
X_C	hmotnostní obsah uhlíku v hořlavině	hm%
X_h	hmotnostní obsah hořlaviny v palivu	hm%
$X_{H,kor}$	korigovaný obsah vodíku v hořlavině	$kg kg^{-1}$
$X_{H,p}$	obsah spalitelného vodíku v palivu	-
X_i	měrná vlhkost vzduchu	$kg kg^{-1}$ suchého vzduchu
$X_{i,vzduch,suš}$	hmotnostní koncentrace složky sušícího vzduchu	hm%
X_{in}	měrná vlhkost na vstupu do sušárny	$kg kg^{-1}$ suchého vzduchu
X_O	hmotnostní koncentrace kyslíku v hořlavině	hm%

X_{out}	měrná vlhkost na výstupu ze sušárny	kg kg ⁻¹ suchého vzduchu
X_S	hmotnostní koncentrace síry v hořlavině	hm%
X_w	hmotnostní koncentrace vody v palivu	hm%
$y^*_{H_2O}$	rovnovážná koncentrace vodní páry ve vlhkém vzduchu	-
y_{H_2O}	koncentrace vodní páry ve vlhkém vzduchu	-
$y_{i,vz}$	objemová koncentrace složky vlhkého vzduchu	%obj.
$y_{i,s.v.}$	objemová koncentrace složky suchého vzduchu	%obj.
$y_{i,sp,kal}$	objemová koncentrace složky spalin ze spalování kalu	%obj.
$y_{i,sp,ZP}$	objemová koncentrace složky spalin ze spalování zemního plynu	%obj.
$y_{i,ZP}$	objemová koncentrace složky zemního plynu	%obj.
$Z\check{Z}$	ztráta žíháním	%
Z_i	konstanta výpočtu entalpie zemního plynu	-
α	součinitel přebytku vzduchu	-
Δh_{ef}	efektivní změna entalpie	kJ kg ⁻¹
Δh_I	izoentropická změna entalpie	kJ kg ⁻¹
$\Delta H_{V\check{Y}P}$	výparné teplo vody	kJ kg ⁻¹
ΔT	rozdíl teplot	°C
ΔT_{PINCH}	minimální teplotní přiblížení	°C
φ	relativní vlhkost	%
η_G	účinnost generátoru	-
η_I	vnitřní účinnost turbíny	-
η_T	termická účinnost kotle	-

12 Seznam obrázků

Obr. 1 Technologické schéma ÚČOV Praha (2003) [6].....	9
Obr. 2 Letecký snímek ÚČOV Praha [8].....	11
Obr. 3 Odstředivý zahušťovač kalů [10].....	12
Obr. 4 Anaerobní stabilizační reaktory ČOV Modřice [3].....	13
Obr. 5 Princip pásového filtračního lisu [10].....	14
Obr. 6 Kalolis s rámovými deskami s fixním objemem [10].....	15
Obr. 7 Zneškodnění čistírenských kalů v ČR v roce 2006 [15].....	16
Obr. 8 Princip bubnové sušárny [21].....	22
Obr. 9 Princip pásové sušárny [21].....	22
Obr. 10 Princip šnekové sušárny [21].....	23
Obr. 11 Princip fluidního sušení [25].....	24
Obr. 12 Disková sušárna odvodněných kalů ČOV Modřice [26].....	25
Obr. 13 Princip tenkovrstvé sušárny [21].....	26
Obr. 14 Schéma spalovny odpadů [21].....	31
Obr. 15 Schéma etážové pece [21].....	32
Obr. 16 Fluidní spalovací pec [10].....	33
Obr. 17 Schéma spalovacího procesu tuhého paliva.....	35
Obr. 18 Bilance teoretické jednostupňové sušárny.....	43
Obr. 19 Teplotní profil HRSG.....	46
Obr. 20 Tepelná bilance výparníku a přehříváku.....	47
Obr. 21 Tepelná bilance ekonomizéru.....	47
Obr. 22 Schéma části procesu s turbínou.....	49

13 Seznam tabulek

Tab. 1 Limitní množství těžkých kovů pro použití do kompostů [17].....	17
Tab. 2 Koeficienty Antoineovy rovnice	36
Tab. 3 Složení vzduchu	50
Tab. 4 Složení kalu.....	51
Tab. 5 Elementární složení hořlaviny kalu.....	51
Tab. 6 Přepočet objemových koncentrací vlhkých spalin na suché spaliny	51
Tab. 7 Hmotnostní bilance sušárny se vzduchem	52
Tab. 8 Tepelná bilance sušárny se vzduchem	52
Tab. 9 Hmotnostní bilance sušárny s termoolejem.....	53
Tab. 10 Tepelná bilance sušárny s termoolejem	53
Tab. 11 Složení zemního plynu a výhřevnost jeho jednotlivých složek	53
Tab. 12 Přehled energetických nároků jednotlivých variant procesů.....	54

14 Seznam příloh

Příloha 1 – CD s diplomovou prací v elektronické podobě obsahující textovou i výpočtovou část.