

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 457

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Jaroslav Boráň

**Zpracování kalů
z čistíren odpadních vod
s energetickým využitím**

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

Ing. Jaroslav BORÁŇ

**ZPRACOVÁNÍ KALŮ Z ČISTÍREN ODPADNÍCH VOD
S ENERGETICKÝM VYUŽITÍM**

ENERGY UTILIZATION OF SEWAGE SLUDGE

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstruktivní a procesní inženýrství

Školitel: Prof. Ing. Petr STEHLÍK, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Jaroslav MEDEK, CSc.
Prof. Ing. Jiří KLEMEŠ, CSc.
Ing. Jan POKORNÝ, CSc.

Datum obhajoby: 29. 2. 2008

Klíčová slova

kal, čistírna odpadních vod, nízkoteplotní termická desintegrace, spalování, energetické využití, odvodnění, výměna tepla

Keywords

sludge, wastewater treatment plant, low-temperature thermal disintegration, incineration, energy utilization, dewatering, heat exchange

Místo uložení práce

Ústav procesního a ekologického inženýrství, FSI, VUT v Brně

Obsah

1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
2.1 Spalovny kalu na principu fluidního lože	7
2.2 Spoluspalování kalů v teplárnách, elektrárnách a spalovnách tuhých komunálních odpadů	7
2.3 Spoluspalování usušeného kalu v cementárnách	7
3 CÍL PRÁCE.....	8
4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	8
5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	9
5.1 Experimentální výzkum	9
5.1.1 Poloprovozní měření na ÚČOV Praha	9
5.1.2 Provozní zkoušky odvodňování pasterizovaného kalu na ČOV Tišnov – vliv teploty kalu na jeho odvodnitelnost	12
5.1.3 Termofyzikální vlastnosti kalu	14
5.1.4 Výměník „voda-kal“	14
5.1.5 Výměník „spaliny-kal“	16
5.1.6 Experimentální zařízení „spaliny-kal“	17
5.2 Návrh technologie energetického využití SSK s předeheřevem kalu	17
6 ZÁVĚR.....	18
LITERATURA	21
ABSTRAKT	22
ABSTRACT	22
ŽIVOTOPIS.....	23

1 ÚVOD

Produkce odpadů patří k lidskému životu stejně tak neodmyslitelně jako jídlo, spánek a ostatní potřeby. Pro zachování trvale udržitelného rozvoje je zapotřebí nejen uplatňovat vhodnou odpadovou politiku, ale také podporovat využívání trvale obnovitelných zdrojů energie. Důraz je kladen na čistotu ovzduší, půdy a vod. Nakládání s odpady se v dnešní době řídí směrnicemi EU, které jsou implementovány do české legislativy.

Nakládáním s odpadními vodami a jejich čištěním se zabývá zákon č. 254/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů. V důsledku harmonizace naší legislativy s normami EU není možné opomenout ani implementovanou směrnici 91/271/EEC, dle které se mimo jiné řídí nakládání s odpadními vodami v obcích nad 2000 ekvivalentních obyvatel (EO). V důsledku plnění výše uvedených norem a stoupajících požadavků na kvalitu vyčištěných odpadních vod se předpokládá zvyšující se produkce kalu.

Likvidace čistírenských kalů je tak stále aktuálním tématem, které je nutné vzhledem k závazkům ČR k EU řešit. V blízké budoucnosti lze očekávat nejen zvyšující se produkci čistírenských kalů, ale také omezování možností jejich zpracování v zemědělství nebo skládkováním. Omezení ukládání kalů na skládku řídí implementovaná směrnice EU 99/31/EEC. Do konce roku 2010 má být sníženo množství biodegradabilních odpadů (kam řadíme i čistírenské kaly) ukládaných na skládky na 75 % produkce těchto odpadů v roce 1995.

Tyto faktory tedy nutí provozovatele čistíren odpadních vod (ČOV) uvažovat o alternativních způsobech nakládání s čistírenskými kaly. Jako ekologicky vhodná varianta se jeví energetické využití kalů. Mezi základní, praxí ověřené a užívané způsoby patří zejména:

- využití bioplynu z procesu anaerobní stabilizace kalu,
- spalování stabilizovaného kalu,
- spalování směsného surového kalu,
- spoluspalování kalu v teplárnách a elektrárnách,
- spoluspalování kalu v cementárnách.

V České republice se však v současné době vyskytuje pouze energetické využití kalu ve smyslu využití bioplynu z procesu anaerobní stabilizace kalu. Je možné konstatovat, že až na ojedinělé poloprovozní experimenty nejsou v ČR zatím v podstatě žádné zkušenosti s provozováním spaloven čistírenských kalů nebo se spoluspalováním ve vhodných zařízeních. Z tohoto důvodu je možné očekávat nedůvěru jak ze strany provozovatelů, tak ze strany širší veřejnosti. Je proto nutné předložit seriózní studie, v ideálním případě podložené provozními zkouškami, které by rozptýlily veškeré obavy.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Přestože jsou známy mnohé zahraniční zkušenosti se spalováním čistírenských kalů v různých zařízeních, v ČR existují zkušenosti pouze se spalováním kalů z průmyslových čistíren odpadních vod. V posledních letech proběhlo několik provozních zkoušek, při kterých se kal z komunálních ČOV spaloval v cementárnách (např. spalování kalu z ÚČOV Praha v Radotíně nebo spalování kalu z ČOV Modřice v cementárně LaFarge Mokrá), rovněž proběhly zkoušky spalování kalu v elektrárně v Mělníku. Přestože výsledky většiny provozních zkoušek vyzněly pro spalování kalu pozitivně, ani v jednom ze zmíněných zařízení zatím nebylo spalování čistírenského kalu uvedeno do trvalého provozu.

Obecně je možné konstatovat, že kal je možné spalovat nebo spalovat v několika typech zařízení:

- speciální spalovny odvodněného kalu,
- spalovny komunálního odpadu,
- cementárny,
- elektrárny a teplárny.

Jedním ze základních dokumentů umožňující rychlou orientaci v problematice spalování kalů je Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration [1], v překladu „Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů“. Na základě tohoto dokumentu je možné konstatovat, že nejčastěji používanými metodami pro termické zpracování čistírenských kalů jsou systémy s fluidním ložem a rotační pece. Zařízení na principu pyrolýzy a zplyňování nejsou v provozním měřítku běžně aplikována.

Při analýzách jednotlivých způsobů termického využití kalu je účelné definovat pojmy „energetické využití“ a „spalování“. Tato definice přímo vyplývá ze zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, v platném znění, kde se spalování odpadů podle § 23 odstavce 1 považuje za energetické využití odpadů pouze tehdy, jestliže:

- a) použitý odpad nepotřebuje po vlastním zapálení ke spalování podpůrné palivo a vznikající teplo se použije pro potřebu vlastní nebo dalších osob, nebo
- b) odpad se použije jako palivo nebo jako přídatné palivo v zařízeních na výrobu energie nebo materiálů za podmínek stanovených právními předpisy o ochraně ovzduší.

Vzhledem k očekávanému vývoji legislativy týkající se nakládání s kaly (biodegradabilními odpady) je vhodné uvažovat o variantě energetického využití kalů (EVK) jako o reálném způsobu nakládání s kaly. Tato metoda však vzbuzuje obavy laické veřejnosti dané zejména obecným nedostatkem informací o spalování kalů (obecně odpadů). Z těchto důvodů je třeba hledat cestu nejen pro efektivní

zhodnocení energie obsažené v kalech, ale i pro rozšíření obecného povědomí o možnostech technologií spalování a zejména systémů čištění spalin.

2.1 SPALOVNY KALU NA PRINCIPU FLUIDNÍHO LOŽE

Přímé spalování kalů je obvykle prováděno ve fluidních kotlích [1], kde je fluidní lože tvořeno křemičitým pískem. Udržení expanze pískového lože je realizováno proudem vhnávaného vzduchu. Do fluidního lože písku je čerpán odvodněný nebo sušený kal. Ve fluidním loži dochází k dosušení (odpaření vody), vznícení a hoření. Teplota nad ložem se obvykle pohybuje v rozmezí 850 až 950 °C. Lehčí organický podíl odchází ve spalinách, zatímco případný těžší podíl a větší, nespalitelné inertní kusy propadají skrz fluidní pískové lože a jsou odstraňovány ze dna spalovny.

2.2 SPOLUSPALOVÁNÍ KALŮ V TEPLÁRNÁCH, ELEKTRÁRNÁCH A SPALOVNÁCH TUHÝCH KOMUNÁLNÍCH ODPADŮ

Při spalování kalů v těchto zařízeních (tento proces se nazývá „spoluspalování“ – „co-firing“) je v podstatě možné uvažovat dvě varianty zpracování kalů.

První z nich spočívá ve spalování odvodněného kalu z ČOV. Kal může být spoluspalován s primárním palivem (nebo odpadem), přičemž množství přidaného odvodněného kalu se obvykle pohybuje do 5 % spotřeby primárního paliva (nebo odpadu). Takto malý přídavek odvodněného kalu nemá významný vliv na proces hoření. Jedná se ale o variantu, která není preferována ze strany provozovatelů těchto zařízení.

Druhou variantou může být spoluspalování předsušených kalů.

2.3 SPOLUSPALOVÁNÍ USUŠENÉHO KALU V CEMENTÁRNÁCH

Ze zahraničních zkušeností se jako jedna z nejvhodnějších technologií pro energetické využití kalů jeví technologie výroby cementu (výpal cementářského slinku). Tato technologie je vhodná jednak z důvodů kapacitních, dále z důvodů vysokých spalovacích teplot a také vzhledem k obdobnému chemickému složení popela z kalů a cementářské suroviny. Vzhledem ke skutečnosti, že po termické reakci je popel z kalů pevně vázán do konečného produktu (tedy cementářského slinku), je tato technologie termického využití kalů bezodpadová.

Přidáváním vhodného množství sušeného kalu k hlavnímu palivu dochází k jeho spalování při velmi vysoké teplotě (teplota nutná pro výpal cementářského slinku je 1 250 až 1 450 °C) a je zaručena dostatečná doba zdržení spalin v oblasti vysokých teplot. Dochází tedy k rozkladu všech nežádoucích organických sloučenin (včetně polychlorovaných dibenzodioxinů a dibenzofuranů – PCDD/F). Anorganický podíl je zabudován do krystalické mřížky slinku, aniž by výrazně ovlivňoval jeho kvalitu.

Spalování kalů jako alternativního paliva v rotačních pecích cementáren je výhodné zejména z následujících důvodů [2]:

- Vysoká spalovací teplota, dostatečná doba prodlevy materiálu a oxidační atmosféra jsou zárukou dokonalého rozkladu organických látek především na vodní páru a oxid uhličitý.
- Veškeré těžké kovy (TK) včetně Hg (která ve formě těkavých sloučenin cirkuluje v systému a zachycuje se na odprašcích) jsou nakonec obsaženy ve výsledném produktu – mletém cementu. Vyluhovací zkoušky ukázaly jejich zafixování v silikátových mřížkách, takže výluhy odpovídají dokonce limitům stanoveným pro pitnou vodu (potvrzeno zkušenostmi v zahraničí a několika experimenty v cementárnách v ČR: Radotín, Čížkovice, Mokrá).
- Měřené emisní limity při experimentech v ČR byly v souladu s platnou legislativou (např. emise TK a tuhých znečišťujících látek (TZL) dokonce o jeden až dva řády nižší než emisní limit, emise PCDD/PCDF o řád nižší).
- Dochází k částečné úspoře suroviny pro výpal slinku díky obdobnému složení. Podle kvality může 1 tuna sušených kalů nahradit až 1/3 tuny vstupní suroviny.
- Dochází k úspoře fosilních paliv alternativními zdroji energie. Energetický obsah kalů může být využit s vysokou účinností. 1 tuna sušených kalů nahradí přibližně 1/3 t uhlí nebo 1/5 t mazutu (při experimentech v ČR se uvádí úspora 261 kg mazutu spálením 1 t sušených kalů). Výhřevnost surového kalu se v odborné literatuře pohybuje mezi 14 a 20 MJ/kg; vyhnilý kal obsahuje nižší podíl organické hmoty, než je tomu u kalu surového, hodnoty se pohybují v rozmezí 8 až 13 MJ/kg.
- Vysušený kal (přibližně 90 % sušiny) je možné smíchat s černým uhlím a spalovat v hlavním hořáku rotační pece nebo může být dávkován spolu s dalšími tuhými alternativními palivy.
- Snaha o využití alternativních paliv, včetně kalů, patří do hlavního programu úspory energií v cementárnách. Např. v Německu nebo ve Francii již některé cementárenské provozy nahradily spalováním alternativních paliv 65 až 75 % fosilních paliv.

3 CÍL PRÁCE

Cílem práce bylo navrhnout ekonomicky a energeticky efektivní variantu nakládání s kaly z čistíren odpadních vod.

4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Práce vychází zejména z experimentálního měření, analýzy získaných výsledků a jejich vhodné aplikace při návrhu technologie pro energetické využití kalů z čistíren odpadních vod.

5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

5.1 EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

Pro získání všech potřebných údajů k podpoření výše uvedených úvah byly provedeny poloprovozní zkoušky odvodnitelnosti kalů na ÚČOV Praha, měření termofyzikálních vlastností kalů v laboratořích Ústavu procesního a ekologického inženýrství (ÚPEI), provozní zkoušky odvodňování pasterizovaných kalů při různých teplotách na ČOV Tišnov a návrh výměníků pro technologii nízkoteplotní termické desintegrace kalů. Výsledky a závěry plynoucí z jednotlivých experimentů jsou uvedeny v následujících kapitolách.

5.1.1 Poloprovozní měření na ÚČOV Praha

Dosavadní omezené poznatky o odvodňování směsného surového kalu byly podnětem k uskutečnění poloprovozních odvodňovacích zkoušek, které byly zaměřeny zejména na zjištění dosažitelného stupně odvodnění směsného surového kalu (SSK). Objem zkoušek stejně tak jako poloprovozní měřítka zkoušek bylo zvoleno z důvodů věrohodnosti obdržených dat a jejich maximální shody s reálným provozem.

Poloprovozní měření na ÚČOV Praha bylo provedeno za účelem stanovení odvodnitelnosti směsného surového a anaerobně stabilizovaného kalu (ASK). Současně byly odebrány vzorky k laboratornímu zjištění některých chemických a fyzikálně-chemických vlastností SSK a ASK. Práce na ÚČOV Praha probíhaly v koordinaci s PVS, a.s. za účelem získání komplexních dat pro výzkumné potřeby spolupracujících organizací. Data byla použita k výpočtům energetických bilancí různých variant kalových koncovek.

Odvodňování probíhalo na mobilní odstředivce KHD Humboldt Wedag o jmenovitém výkonu 12 m³/h pronajaté od SČVK, a.s.

Nedílnou součástí funkčnosti separačního procesu byl výběr, kvalitní příprava a dávkování práškového organického flokulantu. Výběr vhodných typů organických flokulantů byl konzultován přímo se zástupci několika výrobců. Na základě jejich doporučení byly při poloprovozních zkouškách použity následující flokulanty:

- ZETAG 7651 – Ciba Speciality Chemicals,
- PRAESTOL 854 BC-S, PRAESTOL 855 BS – Degussa Praha, s. r. o.,
- SOKOFLOK 68 – Sokoflok, s. r. o.,
- VTA F 096 MHW, VTA F 098 MHW – VTA Engineering und Umwelttechnik, s. r. o.

Měření odvodnitelnosti kalu probíhalo ve dvou časových blocích.

V prvním bloku, který trval pět dní, byly sledovány vlastnosti a odvodnitelnost SSK. Každý den byl pro odvodňování použit jeden z výše jmenovaných flokulantů, pátý den byl rezervní pro případ vyskytnuvších se technických problémů. Odstředivka byla průběžně seřizována dle zkušeností obsluhy a vzhledu odvodněného kalu a fugátu (kalové vody). Odvodněný kal byl z odstředivky odváděn pásovým dopravníkem do přistaveného kontejneru. Roztok flokulantu byl

míchán v tříkomorovém systému, který je součástí mobilního zařízení, a následně dávkován přímo do odstředivky.

Po dosažení vhodného nastavení odstředivky (dobrý vzhled odvodněného kalu, fugát přiměřené čistoty) a ustálení jejího provozu byl odebrán vzorek kalu a fugátu. U každého odebraného vzorku odvodněného kalu byl sledován obsah sušiny a ztráta žiháním. Tyto hodnoty byly průběžně stanovovány laboratoří PVK, a.s. Další analýzy by vypracovány akreditovanou laboratoří Aquatest, a.s.

Ve druhém bloku měření, který trval dva dny, byly sledovány vlastnosti a odvodnitelnost ASK, který byl do mobilní odstředivky čerpán z přírodního potrubí kalu k odstředivkám instalovaným na ÚČOV Praha. Časová prodleva mezi prvním a druhým blokem měření byla zvolena s ohledem na dobu zdržení kalu ve vyhnívacích nádržích. Odstředivka byla opět průběžně seřizována dle zkušeností obsluhy

a vzhledu odvodněného kalu a fugátu. Vzorky odvodněného kalu a fugátu pro laboratorní rozbor byly odebírány stejným způsobem jako při odvodňování SSK. Navíc byl pracovníky laboratoře Aquatest, a.s. odebrán vzorek bioplynu z vyhnívací nádrže ke stanovení jeho složení.

Dosažitelný stupeň odvodnění SSK

Poloprovozními zkouškami odvodňování směsného surového kalu bylo prokázáno, že tento kal je možné odvodnit od přibližně 25 do 33 hm. % sušiny. Výraznou roli na výsledcích samozřejmě sehrály použité flokulanty a nastavení mobilní odstředivky. Výsledky jsou do jisté míry specifické pouze pro daný kal a danou ČOV. Předpokládáme však, že v provozním měřítku a při ustáleném chodu odvodňovacího zařízení, by bylo dosahováno obsahu sušiny kolem 35 hm. %.

Pro snazší orientaci jsou v tab. 1 shrnuty dosažené obsahy sušiny v odvodněném směsném surovém kalu s použitím různých flokulantů.

Flokulant	Obsah sušiny v odvodněném kalu [hm. %]		
	min.	průměr	max.
ZETAG 7651	24,2	24,8	25,3
VTA F 098	31,5	33,0	35,7
VTA F 096	31,4	32,9	34,1
SOKOFLOK 68	26,2	29,9	33,2
PRAESTOL 854 BC-S	25,0	25,8	26,6
PRAESTOL 855 BS	24,8	25,0	25,1

Tab. 1 Přehled obsahu sušiny dosahovaného během měření SSK

Dosažitelný stupeň odvodnění ASK

Při poloprovozních zkouškách odvodňování anaerobně stabilizovaného kalu bylo dosaženo obsahu sušiny v odvodněném kalu od přibližně 29 do 36 hm. %. Teplota kalu na vstupu do odstředivky se pohybovala okolo 40 °C, což odpovídá teplotě kalu po anaerobní termofilní stabilizaci. V porovnání s trvalým provozem odstředivek na ÚČOV Praha byl tedy obsah sušiny mírně nižší, zato však měrná spotřeba flokulantu byla velmi vysoká. Rovněž kvalita fugátu byla horší než hranice 1000 mg/l. Tato hodnota byla překročena u všech vzorků odebraných při použití flokulantů firem CIBA a VTA. Pouze s flokulanty SOKOFLOK bylo dosaženo přijatelného znečištění fugátu nerozpuštěnými látkami. Kvalita fugátu dosahovaná při odvodňování SSK byla výrazně lepší než při odvodňování ASK. Je to přičítáno zejména zvýšení podílu jemných částic v anaerobně stabilizovaném kalu v důsledku procesu termofilního vyhnívání.

Lze předpokládat, že vysoká měrná spotřeba flokulantu, stejně jako znečištění fugátu nerozpuštěnými látkami, bylo způsobeno krátkým časem působení flokulačního roztoku na kal. Dobu kontaktu je možné v praxi měnit použitím vzdálenějšího dávkovacího místa flokulantu od odstředivky, což nebylo díky konfiguraci mobilní odstředivky možné. Vzhledem k tomuto faktu nedocházelo ke včasnému vzniku vloček dostatečné velikosti tak, aby byla zaručena dobrá funkce odstředivky.

Pro snazší orientaci ve výsledcích odvodňovacích zkoušek ASK jsou v tab. 2 shrnuty dosažené obsahy sušiny v odvodněném kalu s použitím různých flokulantů.

Flokulant	Obsah sušiny v odvodněném kalu [hm. %]		
	min.	průměr	max.
ZETAG 7651	29,2	30,8	33,0
VTA F 098	34,3	35,3	36,7
VTA F 096	34,2	34,9	35,9
SOKOFLOK 68	35,6	36,0	36,4

Tab. 2 Přehled obsahu sušiny dosahovaného během měření ASK

Složení spalitelné části

Na základě provedených elementárních rozborů složení směsného surového a anaerobně stabilizovaného kalu je možné konstatovat, že hodnoty získané poloprovozním měřením na ÚČOV Praha jsou v dobré shodě s hodnotami uváděnými v odborné literatuře [3]. V podobné shodě jsou i stanovené podíly hořlaviny a popelovin pro SSK i ASK.

Spalné teplo a výhřevnost sušiny kalu

Obdržené hodnoty spalného tepla a výhřevnosti sušiny směsného surového a anaerobně stabilizovaného kalu jsou v souladu s hodnotami uváděnými v odborné

literatuře [3]. V tab. 3 jsou souhrnně uvedeny výsledky laboratorních analýz a hodnoty uváděné v odborné literatuře [3].

Veličina	Jednotka	Spalné teplo sušiny SSK	Výhřevnost sušiny SSK	Spalné teplo sušiny ASK	Výhřevnost sušiny ASK
Laboratorní výsledky	kJ/kg	16460	15328	12180	11220
Odborná literatura	kJ/kg	-	14800	11180	10250

Tab. 3 Vzájemné porovnání vypočtených a laboratorně stanovených hodnot s hodnotami uváděnými v odborné literatuře [3]

5.1.2 Provozní zkoušky odvodňování pasterizovaného kalu na ČOV Tišnov – vliv teploty kalu na jeho odvodnitelnost

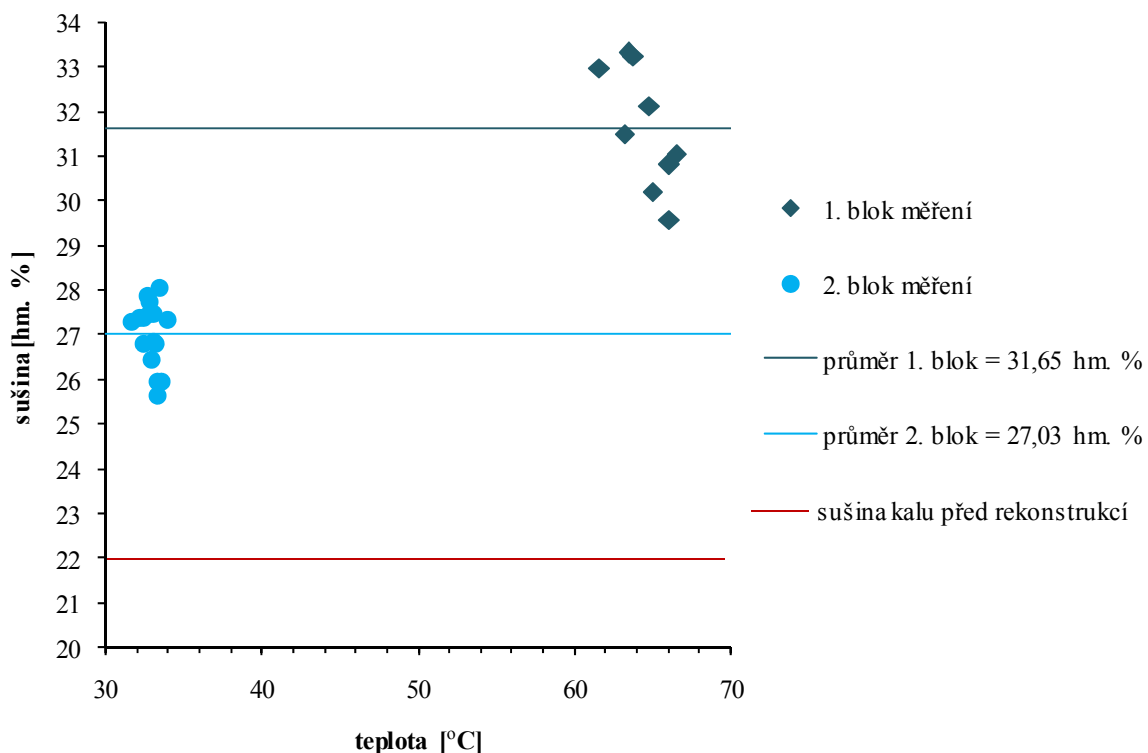
Sledování závislosti odvodnitelnosti kalu na jeho teplotě při níže popsaných provozních zkouškách mělo zásadní význam při počátečních úvahách o nízkoteplotní termické desintegraci kalu. K experimentu byla vybrána ČOV Tišnov, jejíž technologické řešení umožňovalo realizovat zkoušky v provozním měřítku.

Měřením odvodnitelnosti kalu na ČOV Tišnov byla v provozních podmínkách prokázána možnost dosažení vyšší hodnoty sušiny kalu v důsledku jeho nízkoteplotní termické desintegrace. Dalším, výrazně pozitivním efektem je lepší odvodnitelnost teplého pasterizovaného kalu v důsledku snížení jeho zdánlivé viskozity.

Na obr. 1 je provedeno porovnání naměřených dat včetně vyčíslení průměrných hodnot pro jednotlivé bloky měření. Po analýze těchto dat je možné konstatovat následující:

- Na základě provozních záznamů z období před a po rekonstrukci čistírny došlo zařazením procesu pasterizace ke zvýšení sušiny odvodněného kalu z 22 hm. % na 27 hm. %. Při procesu pasterizace bylo současně dosaženo procesu nízkoteplotní termické desintegrace kalu. Rozdíl sušiny kalu před rekonstrukcí a po zařazení procesu pasterizace je přibližně 5 hm. % absolutních.
- Průměrná hodnota sušiny při odvodňování teplého (přibližně 61 až 66 °C) pasterizovaného kalu je 31,65 hm. %. Tento pozitivní efekt je způsoben nižší zdánlivou viskozitou teplého pasterizovaného kalu před jeho odvodněním.

- Průměrná hodnota sušiny při běžných provozních podmínkách (přibližně 33 °C) je 27,03 hm. % – tento výsledek je ve velmi dobré shodě s výsledky provozovatele ČOV.
- Rozdíl průměrných hodnot sušiny teplého a ochlazeného pasterizovaného kalu je přibližně 4,6 hm. % absolutních.
- Zvýšení specifické spotřeby flokulantu při odvodňování ochlazeného pasterizovaného kalu v druhém bloku měření nijak výrazně neovlivnilo sušinu kalu dosahovanou po jeho odvodnění.
- Poměrně jednoduchou úpravou technologie kalové koncovky ČOV lze na ČOV Tišnov trvale odvodňovat při teplotách přibližně 65 °C a dosahovat tak vyšších hodnot sušiny na výstupu z odstředivky (tato úprava se jeví jako perspektivní z hlediska budoucího výzkumu).
- Zahřátí kalu při pasterizaci má jednoznačně pozitivní vliv na obsah sušiny v odvodněném kalu. Pokles vlhkosti v odvodněném kalu znamená i změnu konzistence z kompaktní „hroudovitě“ (téměř rypné) konzistence na rozpadající se sypanou konzistenci.
- Na základě dosažených výsledků je možné očekávat podobnou teplotní závislost i u ostatních druhů čistírenských kalů.



Obr. 1 Srovnání dosažených výsledků při provozních zkouškách

Obdržené hodnoty jednoznačně dokazují přímou závislost mezi teplotou odvodňovaného kalu a jeho sušinou po odvodnění. Zlepšení odvodnitelnosti kalu je způsobeno narušením struktury buněk při zahřátí na vyšší teplotu a snížením jeho

zdánlivé viskozity. Na základě těchto zjištění byl laboratorní výzkum zaměřen na termofyzikální vlastnosti kalu.

5.1.3 Termofyzikální vlastnosti kalu

Základními daty pro výzkum a vývoj v oblasti nízkoteplotní termické desintegrace kalu jsou jeho termofyzikální vlastnosti, které patří mezi nejdůležitější vstupní data při návrhu výměníku tepla pro ohřev kalu. Pro získání věrohodných vstupních dat bylo provedeno měření hustoty, tepelné kapacity a dynamické viskozity v teplotním rozmezí 20 až 50 °C.

Na základě provedené rešerše bylo přistoupeno k rozsáhlému měření termofyzikálních vlastností pro různé druhy kalů tak, aby vznikl komplexní soubor dat využitelný nejen pro experimentální účely ale i průmyslovou praxi. Uvedené veličiny byly měřeny pro směsný surový, anaerobně stabilizovaný a pasterizovaný kal.

Měření viskozity kalů bylo ověřeno, že kaly patří mezi viskoplastické neneutonské kapaliny a závislost smykového napětí na smykové rychlosti je charakterizována Herschel-Buckleyho matematickým modelem. Zdánlivá viskozita kalů je dle stanovených hodnot řádově vyšší než dynamická viskozita vody, z tohoto důvodu nelze při návrhu zařízení pro nízkoteplotní desintegraci kalů použít korigovaných hodnot dynamické viskozity vody. Zdánlivá viskozita kalů se vzrůstající teplotou klesá.

Měrná tepelná kapacita kalu vykazovala mírný pokles při vzrůstajících teplotách. Díky vysokému obsahu vody v kalu je možné v daném teplotním rozsahu uvažovat měrnou tepelnou kapacitu této suspenze za shodnou s měrnou tepelnou kapacitou vody.

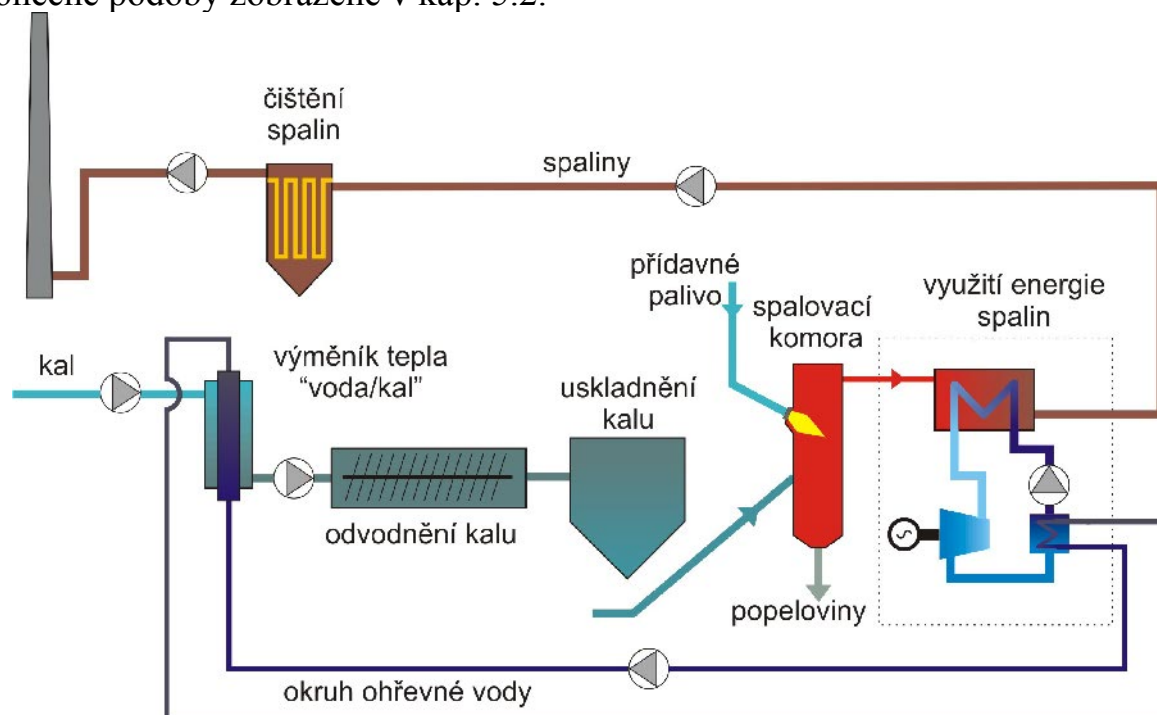
Z provedených měření hustoty výše uvedených kalů je zřejmý pokles hustoty kalu se zvyšující se teplotou. Tento pokles odpovídá (při uvažování daného hmotnostního zastoupení vody v suspenzi voda-kal) poklesu hustoty vody. Rozdíl mezi hustotou vody a výše uvedených druhů kalu je v řádu jednotek procent (jedno až tři procenta) a při dalších analýzách je proto možné uvažovat hustotu kalu obdobnou jako hustotu vody.

Měření se podařilo položit základy unikátní databázi vlastností kalů, z níž je možné čerpat při návrhových, výpočtových a projektových pracích.

5.1.4 Výměník „voda-kal“

Po provedení analýzy vlivu teploty na odvodnitelnost kalu bylo přistoupeno k návrhu výměníku tepla pro předehřev kalu vodou, který by sloužil nejen pro laboratorní, ale současně i poloprovozní testování. Konstrukční práce byly prováděny s ohledem na jeho kompaktnost, výkonovou přizpůsobivost a snadné čištění teplosměnných ploch. Na základě provedené analýzy byla současně vypracována koncepce zapojení výměníku tepla do procesu energetického využití kalů (viz obr. 2). Neodvodněný kal je dle schématu čerpán přes výměník tepla, kde

dochází k jeho ohřátí, na odstředivku a odtud je odvodněný dále transportován na uskladnění před procesem termického zpracování v kotli pracujícím na principu fluidního lože. Vznikající spaliny jsou zužitkovány v kotli na odpadní teplo, vyrobená pára je využita k výrobě elektrické energie. Nízkopotenciální teplo z kondenzátoru slouží k ohřevu vody pro výměník „voda-kal“. Tato základní koncepce byla na základě výsledků experimentálního výzkumu dále rozvíjena až do konečné podoby zobrazené v kap. 5.2.



Obr. 2 Koncepce zapojení výměníku tepla „voda-kal“ do procesu energetického využití kalů

Na základě provedené rešerše a vyhodnocení požadovaných parametrů výměníku bylo zvoleno konstrukční řešení výměníku tepla založené na šroubovicovém kanálu s obdélníkovým průřezem, která je vložena do válcového pláště. Šroubovice je vinuta kolem středové trubky a je rozdělena na otevřenou část a na část uzavřenou. V uzavřené části šroubovice proudí od spodu nahoru voda a v otevřené části proudí opačným směrem kal.

Daný výměník tepla lze po úspěšných zkouškách využívat nejen pro experimentální účely, ale i pro přehřev kalu před jeho dalším zpracováním v průmyslové praxi.

Výhodami takovéto konstrukce výměníku tepla jsou:

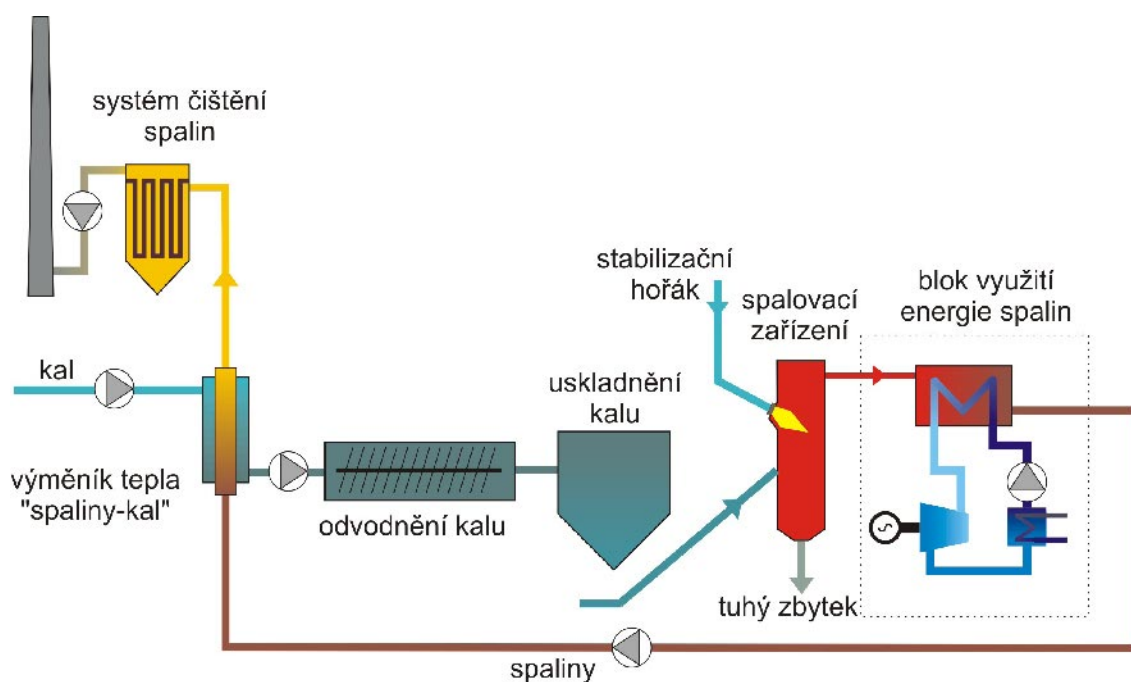
- snadné čištění na straně kalu,
- uzavřený cirkulační okruh media pro přenos tepla s upravenou vodou odstraňuje nutnost čištění teplosměnných ploch na straně vody,
- pozitivní vliv zakřivení kanálu na samočisticí schopnost,
- snížení tlakové ztráty na straně kalu využitím samospádu,
- velká plocha výměny tepla při malé zastavěné ploše.

Nevýhodou může naopak být vyšší náročnost výroby a z toho plynoucí vyšší výrobní náklady, které jsou však úměrné velikosti teplosměnné plochy.

5.1.5 Výměník „spaliny-kal“

Na základě předchozího výzkumu bylo přikročeno k analýze ohřevu kalu jiným médiem než vodou. Uvažovaný způsob vychází z bilance procesních proudů při spalování (energetickém využití) kalu, kdy spaliny vycházející z bloku využití energie spalin musí být ochlazeny na teplotu přijatelnou pro jejich čištění.

Tento Princip včetně možného umístění výměníku tepla „spaliny-kal“ je zobrazen na obr. 3.



Obr. 3 Koncepte zapojení výměníku tepla „spaliny-kal“ do procesu energetického využití kalů

Toto technologické uspořádání umožňuje jednak využití odpadního tepla spalin odcházejících z procesu spalování a jednak umožňuje využití nízkopotenciálního tepla např. na vytápění nebo ohřev užitkové vody. Tato koncepce tedy zvyšuje energetickou účinnost celé jednotky.

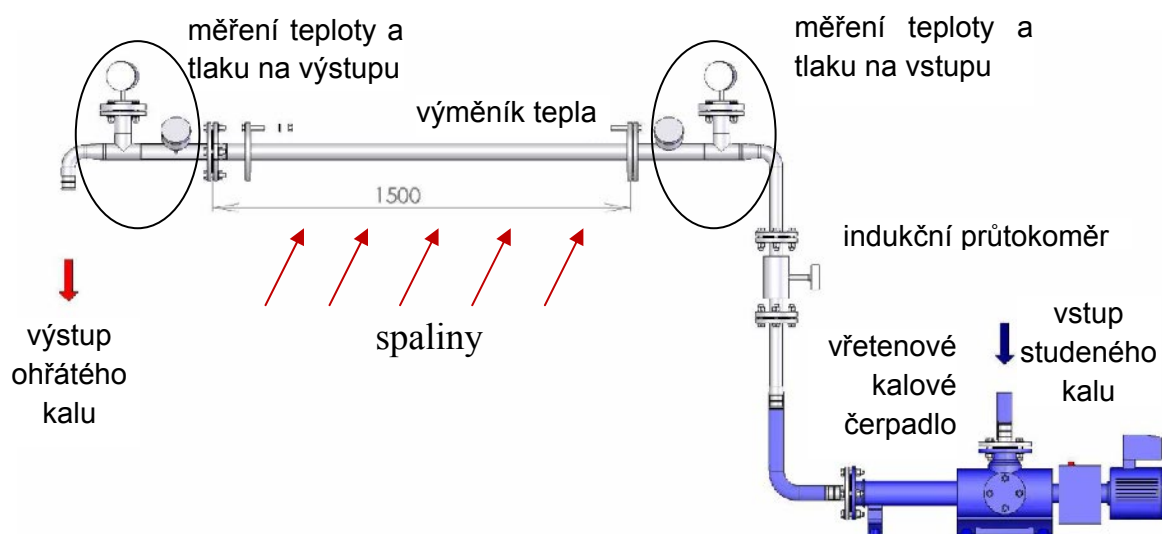
Za tímto účelem bylo přistoupeno k vývoji výměníku tepla „spaliny-kal“, který by sloužil k nízkoteplotní termické desintegraci kalu pomocí energie spalin. Konceptně bylo uvažováno s trubkovým žebrovaným výměníkem s několika chody, který by byl umístěn ve spalinovodu.

Potenciálním zdrojem problémů, může být nepředvídatelné chování suspenze „voda-kal“ při ohřevu spalinami o teplotě až 400 °C. Z tohoto důvodu byl výzkum v první fázi zaměřen na ověření resp. vyvrácení předpokladu napékání kalu na teplosměnnou plochu. Za tímto účelem bylo zkonstruováno experimentální zařízení umožňující sledovat chování kalu ve výše uvedených podmínkách.

5.1.6 Experimentální zařízení „spaliny-kal“

Experimentální zařízení představuje výměník tepla s jednoduchou trubkovou konstrukcí, který je snadno čistitelný a umožňuje pozorování napékání kalů na teplosměnnou plochu. Pro účely experimentu bylo zařízení doplněno o průtokoměr, tlakoměry a teploměry tak, aby bylo možné vyhodnotit průběh experimentu a porovnat jeho výsledky s analytickým a CFD modelem (viz obr. 4).

Ke zkouškám byla využita spalovací komora zkušební hořáků, která je umístěná v těžkých laboratořích Ústavu procesního a ekologického inženýrství.



Obr. 4 Experimentální okruh pro ověření napékání kalů

Experimentem nebylo potvrzeno napékání kalů na teplosměnnou plochu. Nálep v horní části potrubí byl zapříčiněn neúplným zaplavením trubky výměníku při nízkých průtocích kalu. Tento jev je však možné při vhodném uspořádání v reálném provozu vyloučit. Na základě vyhodnocení provedeného experimentu je možné konstatovat, že ohřev kalu spaliny nepotvrdil hypotézu napékání kalu na teplosměnnou plochu.

5.2 NÁVRH TECHNOLOGIE ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ SSK S PŘEDEHŘEVEM KALU

Zabudování procesu nízkoteplotní termické desintegrace do linky spalování SSK kvalitativně změní proces spalování na proces energetického využití kalu, který po vlastním zapálení již nepotřebuje k procesu hoření přídavné palivo. Pro předeřev kalu je možné využít odpadního tepla spalin, které při vhodném systému rekuperace tepla postačuje k dosažení efektu zvýšení odvodnitelnosti kalu (viz obr. 5).

Bilance procesu spalování a ohřevu kalu byly provedeny pomocí programů vytvořených v rámci předchozího výzkumu autorského kolektivu Houdková, Pavlas, Kilkovský, Boráň.

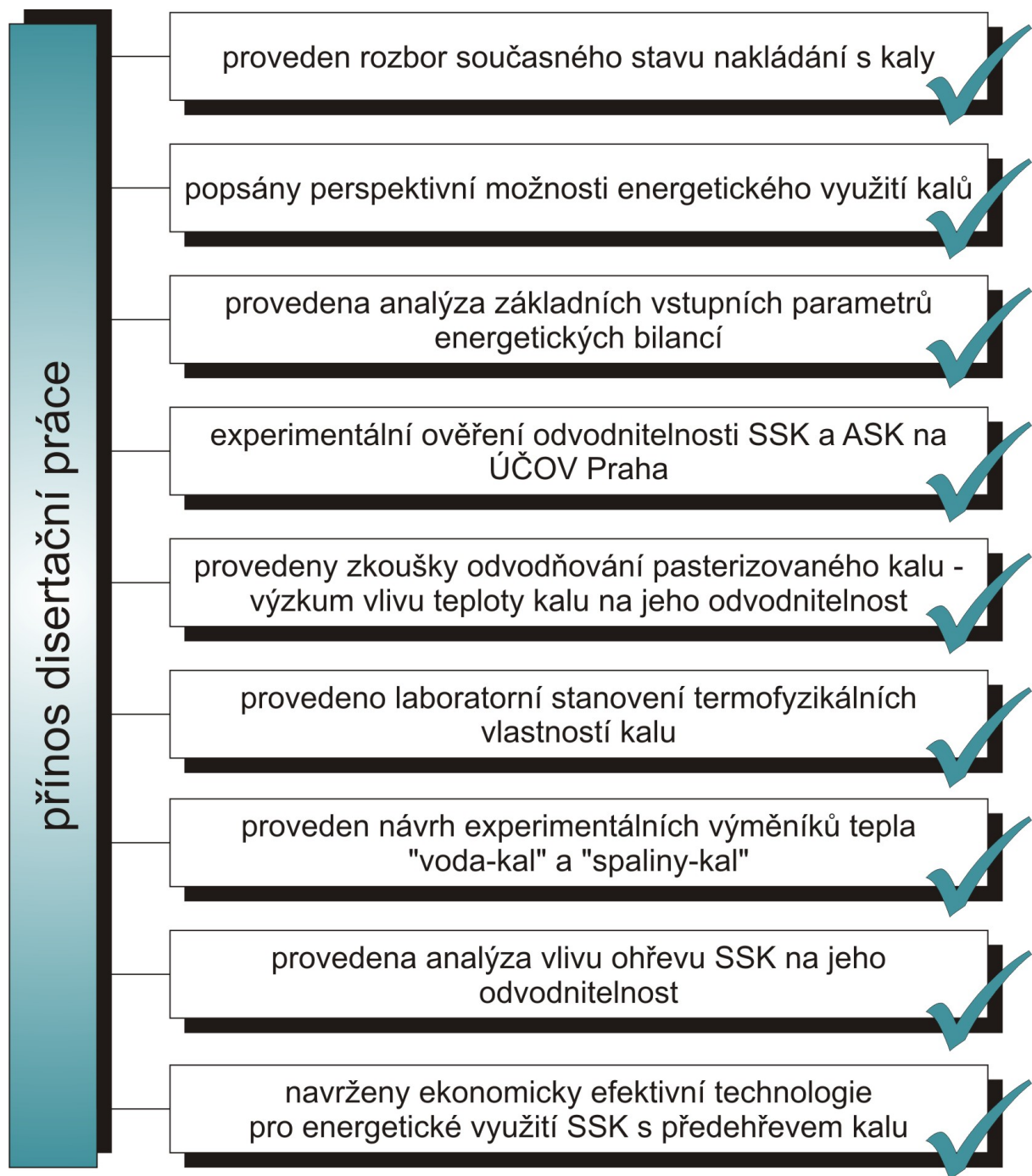
Při analýze chování kalu byla provedena řada laboratorních, poloprovozních a provozních experimentů, které sloužily k získání komplexních údajů o chování čistírenského kalu. Provedená laboratorní měření viskozity, hustoty a tepelné kapacity kalu ukázala zejména u viskozity kalu na výraznou odlišnost vlastností v porovnání s vodou. Provozním měřením byla ověřena hypotéza, že odvodnitelnost kalu se zlepšuje se zvyšující se teplotou kalu. Výsledky získané měřeními byly využity pro návrh výměníku tepla „voda-kal“ a experimentálního výměníku „spaliny-kal“, pomocí kterého byla vyvrácena hypotéza možného napékání kalu na teplosměnnou plochu při ohřevu spalinami.

V závěru práce byl proveden rozbor vlivu odvodnitelnosti kalu na materiálovou a energetickou bilanci procesu spalování kalu, kde se projevil výrazně pozitivní efekt nízkoteplotní termické desintegrace kalu. Dále je diskutována praktická integrace technologie termické desintegrace do stávajícího a nového procesu spalování kalů.

Závěrem je možné konstatovat, že energetické a materiálové toky procesu spalování ukazují možnost využití odpadního resp. nízkopotenciálního tepla pro termickou desintegraci kalů. Mezi zásadní přínosy této technologie pro proces energetického využití kalu lze zařadit:

- snížení množství spalovaného materiálu vlivem účinnějšího odvodnění až o 13 %, což snižuje investiční a provozní náklady jednotky energetického využití kalů,
- dávkování přídavného paliva je nutné pouze při najíždění provozu, což přináší úsporu provozních nákladů,
- snížení množství spalin až o 13 % v závislosti na provozních podmínkách, což opět přináší snížení provozních nákladů,
- množství energie obsažené ve spalinách (po odečtení energie vnesené přídavným palivem) narůstá vlivem vyšší výhřevnosti spalovaného kalu.

Schematicky lze znázornit přínos disertační práce následujícím způsobem – viz obr. 6.



Obr. 6 Přínos disertační práce

LITERATURA

- [1] European Commission. *Integrated Pollution Prevention and Control – Reference document on the Best Available Techniques for Waste Incineration* [online]. 2005 [cit. 2006-12-07]. Dostupné z: <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>
- [2] ŠŤASTA, P.; BORÁŇ, J.; BÉBAR, L.; STEHLÍK, P.; ORAL, J. Thermal Processing of Sewage Sludge. *Applied Thermal Engineering*, 2006, roč. 26, č. 9, s. 1420-1426. ISSN: 1359-4311.
- [3] Kolektiv autorů, *Kaly a odpady 2002 : sborník příspěvků mezinárodní konference Kaly a odpady 2002.*, Brno : Asociace čistírenských expertů, 2002.
- [4] ORAL, J.; ŠIKULA, J.; PUCHÝŘ, R.; HAJNÝ, Z.; STEHLÍK, P.; BÉBAR, L. Processing of Wastes from Pulp and Paper Plant. *Journal of Cleaner Production*, 2005, roč. 13, č. 5, s. 509-515. ISSN: 0959-6526
- [5] WHERTER, J.; OGADA, T. Sewage Sludge Combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, vol. 25, s. 55-116.
- [6] NIESSEN, W. R. *Combustion and Incineration Processes*, Marcel Dekker, New York, 1995
- [7] FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 12, Issue 1, January 2008, s. 116-140
- [8] CORBITT, R. A. *Standard Handbook of Environmental Engineering*, McGraw Hill, New York, 1998
- [9] TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L. *Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse*, McGraw Hill, New York, 1991
- [10] KOS, M.; SÝKORA, K. *Kalové hospodářství malých ČOV*, Technicko – ekonomická studie MZ ČR, Hydroprojekt, Praha, 1995
- [11] MEDEK, J. *Hydraulické pochody*. 4. vyd. Brno: CERM, 2004, 339 s. ISBN 80-214-2640-3
- [12] Wakeman, R. J. Separation technologies for sludge dewatering, *Journal of Hazardous Materials* Volume 144, Issue 3, 18 June 2007, Pages 614-619 "Selected papers of the proceedings of the 5th European Meeting on Chemical Industry and Environment, EMChIE 2006 " held in Vienna, Austria, 3-5 May 2006

ABSTRAKT

Disertační práce je zaměřena na problematiku zpracování kalů z čistíren odpadních vod jako jednoho ze stálých, množstevně nezanedbatelných druhů odpadů. V úvodní části práce jsou popsány a zhodnoceny jednotlivé způsoby nakládání s kaly v ČR a v zemích Evropské unie.

Práce je orientována zejména na předběžnou úpravu (předúpravu) kalů před procesem spalování kalů ve smyslu jejich energetického využití. Pozornost je věnována nízkoteplotní termické desintegraci kalů a s ní souvisejícím experimentům, poloprovozním a provozním měřením, návrhům a experimentálním ověření vhodných výměníků tepla včetně zabudování technologie do procesu spalování kalů.

V práci jsou zhodnoceny efekty nízkoteplotní termické desintegrace kalu na proces termického zpracování (spalování) kalu, kdy může dojít ke kvalitativní změně z procesu likvidace na proces energetického využití kalu bez potřeby přídavného paliva. Výhodou nízkoteplotní termické desintegrace kalu je také snížení množství odvodněného kalu a zvýšení energetické účinnosti procesu.

ABSTRACT

Subject of the present PhD thesis is the treatment of sewage sludge as one of the types of waste that our civilisation produces continually and in significant quantities. The introductory part of the work describes various ways of sludge treatment used in the Czech Republic and countries of the European Union.

The core of the research work described in the thesis is sludge pre-treatment, which means the treatment applied to sludge before it can be incinerated in order to utilise its energy value. Attention is aimed at the process of low-temperature thermal sludge disintegration with related laboratory experiments, pilot plant and full-scale plant operating measurements, design and experimental verification of suitable heat exchangers and integration of this technology with sludge incineration process.

The work provides an assessment of the effects of low-temperature thermal disintegration of sludge on its incineration, namely with regard to the possibility of sludge combustion without auxiliary fuel. That means an important qualitative transition from sludge disposal to its utilisation. The most important benefits of low-temperature thermal disintegration process are the reduction of sludge amount and increased energy efficiency of the plant.

ŽIVOTOPIS

Ing. Jaroslav BORÁŇ (narozen 19. 4. 1980)

Vzdělání a akademická kvalifikace

- 1998, SPŠ Přerov, obor elektrotechnika
- 2003, Ing., Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, obor Procesní inženýrství
- 2003 - dosud, PhD., Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, obor Procesní inženýrství

Přehled zaměstnání

- 2005 - dosud, asistent, Ústav procesního a ekologického inženýrství FSI VUT v Brně

Vědeckovýzkumná činnost

- výzkum v oblasti zpracování a využití čistírenských kalů a biodegradabilních odpadů

Mezi dosud realizované aktivity, na kterých se navrhovatel podílel v rámci výzkumu v dané oblasti, lze zařadit:

- návrh a realizace laboratorních fermentačních jednotek
- výzkum a vývoj tepelného výměníku „voda-kal“
- studie zpracování kalů z čistíren odpadních vod v cementárně Prachovice
- studie možností energetického využití kalů v podniku Biocel Paskov, a.s.

Odborná praxe

Pracovník absolvoval opakovaně odbornou praxi na pozici konstruktéra technologických částí čistíren odpadních vod ve firmě KUNST, s.r.o. Hranice.

Projekty

spolupráce při řešení projektů:

- 2005 - dosud: výzkumný záměr MŠMT č. MSM 0021630502 Ekologicky a energeticky řízené soustavy zpracování odpadů a biomasy
- 2005 - dosud: mezinárodní projekt INCO-CT-2005-013359 Ecophos - Waste utilisation in phosphoric acid industry through the development of ecologically sustainable and environmentally friendly processes for a wide class of phosphorus-containing products

Členství v organizacích

- Asociace čistírenských expertů České republiky
- Česká společnost chemických inženýrů