



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# KONCEPCE TERMICKÉHO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ Z KOMUNÁLNÍ SFÉRY

CONCEPTION OF THERMAL TREATMENT OF WASTE FROM MUNICIPAL SECTOR

## DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Lukáš Frýba

## ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

BRNO 2018

## Abstrakt

V poslední době reaguje legislativa Evropské unie a posléze i jednotlivých členských států na nové poznatky ohledně složení a obsahu škodlivých látek v kalu z komunálních čistíren odpadních vod. To má za následek zavádění moderních technologií na úpravu a zpracování čistírenských kalů. Jedná se o metody, které mají za účel kal hygienizovat, zmenšit jeho množství, materiálově transformovat pro jeho další využití nebo termicky zpracovat a využít produkovanou energii. Práce se zaměřuje na efektivní termické zpracování kalů z čistíren odpadních vod. Důležitou součástí linky na termické zpracování kalů z čistíren odpadních vod je jejich předupravení a snížení obsahu vody. Snížení obsahu vody je energeticky náročný proces, pro který je vhodné získat odpadní teplo z energetických zdrojů, kde by jinak bylo bez využití mařeno.

## Klíčová slova

Spalování kalů, nízkoteplotní sušení, spoluspalování kalů, technický model

## Abstract

European Union and states of European Union legislation are updated according new information about the composition and content of danger compounds in the sewage sludge from municipal waste water treatment plants. It has the effect on using of modern technologies for disposal in sewage sludge treatment. These methods are designed for sewage sludge hygienization, amount reduction, material transformation for next using or sludge incineration for energy production and utilization. The thesis is focuses on the effective thermal treatment of sewage sludge from waste water treatment plants. An important part of the line for sewage sludge incineration is pre-treatment and reduction of water content. The water content reducing is a high energy consumption process which is helpfull to use waste heat from energy plants where it would be loosed without using.

## Key words

Sewage sludge incineration, low temperature drying, Sewage sludge co-incineration, technical model



## Bibliografická citace práce

FRÝBA, L. *Koncepce termického zpracování odpadů z komunální sféry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 127 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Běbara, CSc., na základě vlastních poznatků získaných při studiu, pracovních zkušenostech a konzultací s odborníky, a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citoval.

V Brně dne 10. listopadu 2018

.....

Ing. Lukáš Frýba

## Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu disertační práce Doc. Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc. a Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. za podporu a vedení během studia. Dále děkuji prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc. za poskytnutí kvalitních studijních podmínek a své rodině za jejich trpělivost a podporu.

Tato práce vznikla v rámci výzkumného projektu č. TE02000236 "Waste-to-Energy (WTE) Competence Centre" (WtECC)

## Seznam obrázků

Obr. 1: Hierarchie nakládání s odpady dle [1].....	14
Obr. 2: Zaměření předchozích disertačních prací na výzkumném pracovišti ÚPEI a znázornění zaměření budoucí disertační práce .....	15
Obr. 3: Rozložení produkce odpadů [14] .....	19
Obr. 4: Technologické schéma čistírny odpadních vod .....	19
Obr. 5: Výchřevnost ASK a SSK v závislosti na obsahu sušiny a porovnání s hodnotami danými laboratorními zkouškami .....	22
Obr. 6: Rozložení produkce v jednotlivých správních obvodech ČR .....	23
Obr. 7: Možné varianty složení kalové koncovky .....	25
Obr. 8: Použití termické hydrolýzy ve světě v roce 2016 [34].....	34
Obr. 9: Technologické schéma termické hydrolýzy od firmy Cambi [35].....	35
Obr.10: Sítopásový lis od firmy Sülzle Klein [42].....	37
Obr. 11: Šroubový lis bez krytů.....	38
Obr. 12: Šroubový lis používaný na odvodnění kalu před vstupem do solární sušárny .....	39
Obr. 13: Vnitřní uspořádání odstředivky [43] .....	39
Obr. 14: Technologické schéma nízkoteplotní pásové sušárny s využitím dvou rozdílných tepelných spádů pro ohřev vzduchu uvnitř sušárny.....	41
Obr. 15: Betonový bunkr na odvodněný kal s hydraulickou jednotkou a čerpadlem kalu.....	42
Obr. 16: 3D model pásové sušárny kalu.....	42
Obr. 17: Proudění vzduchu uvnitř bloku sušárny .....	43
Obr. 18: Vnitřní prostor solární sušárny s přehrabovacím zařízením .....	45
Obr. 19: Solární sušárna na ČOV ve městě Lancut v Polsku .....	46
Obr. 20: Schéma technologie termického zpracování kalů .....	47
Obr. 21: Schéma pyrolýzní jednotky od firmy PYREG [60] .....	49
Obr. 22: Popis technologie termického zpracování kalů pomocí zplyňování [68] .....	50
Obr. 23: Schéma postupu výpočtu sušárny kalu .....	55
Obr. 24: Bilanční schéma vstupy/výstupy první fáze výpočtu.....	56
Obr. 25: Lineární závislost měrné entalpie pro vodní páru na teplotě (ref. Stav 0 °C, 1 atm a H <sub>2</sub> O(l)).....	57
Obr. 26: Náhled na výstupní schéma výpočtu sušárny.....	59
Obr. 27: Graf závislosti měrné spotřeby tepelné energie na teplotě nasávaného čerstvého vzduchu.....	60

Obr. 28: Graf vlivu změny nastavení teploty odpadního vzduchu odváděného ze sušárny na spotřebu energií.....	61
Obr. 29: Graf vlivu změny nastavení relativní vlhkosti odpadního vzduchu odváděného ze sušárny na spotřebu energií.....	62
Obr. 30: Graf závislosti rozdílu produkce a spotřeby tepelné energie na výstupním obsahu sušiny kalu ze sušárny při zpracování anaerobně stabilizovaného kalu menších kapacit .....	69
Obr. 31: Graf závislosti rozdílu produkce a spotřeby tepelné energie na výstupním obsahu sušiny kalu ze sušárny při zpracování směsného surového kalu menších kapacit.....	69
Obr. 32: Graf závislosti rozdílu produkce a spotřeby elektrické energie na výstupním obsahu sušiny kalu ze sušárny menších kapacit.....	70
Obr. 33: Graf závislosti rozdílu měrné produkce a spotřeby elektrické energie na výstupním obsahu sušiny kalu ze sušárny menších kapacit.....	70
Obr. 34: Graf vlivu změny obsahu výstupní sušiny ze sušárny kalu na množství produkované a spotřebované tepelné energie a zemního plynu.....	71
Obr. 35: Technologické uspořádání spoluspalování v existující uhelné elektrárně.....	74
Obr. 36: Technologické uspořádání spoluspalování s uhlím v novém zařízení.....	75
Obr. 37: Technologické uspořádání spoluspalování s odpadem.....	76
Obr. 38: Technologické uspořádání spoluspalování v oddělených ohništích.....	76
Obr. 39: Schéma varianty 1 a 1a složené z anaerobní stabilizace, odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování.....	80
Obr. 40: Schéma varianty 2 a 2a složené z anaerobní stabilizace, odvodnění, nízkoteplotního sušení a termické zpracování v pyrolýzní jednotce .....	81
Obr. 41: Schéma varianty 3 složené z odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování.....	81
Obr. 42: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby tepelné energie menších kapacit.....	82
Obr. 43: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby tepelné energie menších kapacit po zajištění soběstačnosti ve spotřebě tepelné energie .....	83
Obr. 44: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby elektrické energie menších kapacit.....	84
Obr. 45: Schéma varianty 1 složené z anaerobní stabilizace, odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování.....	85
Obr. 46: Schéma varianty 2 složené z anaerobní stabilizace, předodvodnění, termické hydrolýzy, odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování .....	86
Obr. 47: Schéma varianty 3 složené z odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování.....	86
Obr. 48: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby tepelné energie větších kapacit.....	86
Obr. 49: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby elektrické energie větších kapacit.....	88

Obr. 50: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby tepelné energie na 1t sušiny směsného surového kalu.....	89
Obr. 51: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby elektrické energie na 1 t sušiny směsného surového kalu .....	89
Obr. 52: Výkonový diagram kotle pro spalování anaerobně stabilizovaného kalu.....	96

# Seznam tabulek

Tab. 1: Chemické složení ASK a SSK [16] .....	20
Tab. 2: Výhřevnost a spalná tepla ASK a SSK [8] .....	20
Tab. 3: Hodnoty spalného tepla hořlaviny kalu dle různých metod výpočtu [8].....	21
Tab. 4: Množství čištěných odpadních vod v závislosti na množství obyvatel připojených na kanalizační síť [19] .....	24
Tab. 5: Vývoj produkce kalů na ČOV a způsobu nakládání v ČR v roce 2009-2016 [19] ....	24
Tab. 6: Mezní hodnoty koncentrací škodlivých látek pro použití na zemědělské půdě [20]..	26
Tab. 7: Mikrobiologická kritéria pro upravený kal pro aplikaci na zemědělské půdě v přechodném období do 31.12.2019 [20] .....	27
Tab. 8: Mikrobiologická kritéria pro upravený kal pro aplikaci na zemědělské půdě od 1.1.2020 [20].....	27
Tab. 9: Emisní limity platné v ČR pro střední a velká spalovací zařízení spalující dřevo nebo biomasu, nekontaminovaný dřevní odpad, kůru a podobné rostlinné látky [24].....	28
Tab. 10: Maximální přípustné koncentrace znečišťujících látek v emisích ze spaloven odpadů dle vyhlášky č. 415/2012 Sb.[24], respektive dle směrnice evropské komise 2010/75/EU[25], (vztaženo na suché spaliny při 0°C a 101,325 kPa, referenční obsah kyslíku 11 % obj.) .....	29
Tab. 11: Emisní limity pro spalování odpadů v cementářských pecích.....	29
Tab. 12: Srovnání elektrických spotřeb odstředivky a šroubového lisu [36] a [39] .....	36
Tab. 13: Porovnání výhod a nevýhod zařízení pro mechanické odvodnění kalu .....	37
Tab. 14: Chemické složení kalu z laboratorních zkoušek [10].....	51
Tab. 15: Chemické složení produkovaného bioplynu z anaerobní stabilizace [10].....	51
Tab. 16: Vstupní a výsledné hodnoty hmotnostní a energetické bilance.....	52
Tab. 17: Upravené hodnoty hmotnostní a energetické bilance .....	53
Tab. 18: Upravené chemické složení anaerobně stabilizovaného kalu.....	53
Tab. 19: Přehled zadávacích parametrů do výpočtového modelu sušárny kalu .....	54
Tab. 20: Látkové konstanty Antoineovy rovnice pro H <sub>2</sub> O .....	56
Tab. 21: Konstanty pro výpočet měrné entalpie suchého vzduchu [72].....	58
Tab. 22: Výsledky bilančního modelu sušárny pro proměnou teplotu odpadního plynu .....	61
Tab. 23: Výsledky bilančního modelu sušárny a termického zpracování pro proměnou relativní vlhkost odpadního plynu.....	62
Tab. 24: Vstupní parametry odvodněného kalu na vstupu do pásové sušárny .....	66
Tab. 25: Výstupní parametry bilančního modelu nízkoteplotní sušárny kalu .....	67
Tab. 26: Výstupní parametry bilančního modelu spalování kalu .....	68
Tab. 27: Vstupní chemické složení paliv pro varianty spoluspalování 1-4 .....	74

Tab. 28: Složení vzniklých spalin pro varianty 1-4.....	77
Tab. 29: Vstupní parametry a výsledné produkce energií pro varianty 1-4 .....	77
Tab. 30: Spotřeby a produkce tepelné energie v jednotlivých procesech kalové koncovky menších kapacit .....	82
Tab. 31: Navýšení výkonu kogenerace pro zajištění soběstačnosti tepelné energie .....	83
Tab. 32: Spotřeby a produkce tepelné energie v jednotlivých procesech kalové koncovky větších kapacit .....	87
Tab. 33: Spotřeby a produkce energií v jednotlivých procesech kalové koncovky na 1 t sušiny směšného surového kalu .....	88
Tab. 34: Hodnoty kritéria Energy efficiency (R1) a dílčích parametrů.....	91
Tab. 35: Příklady rozměrů rotačních pecí a výkonového zatížení [94].....	97
Tab. 36: Produkce odpadů v ČR pro roky 2008 až 2017 .....	118
Tab. 37: Produkce a nakládání s kaly v ČR pro roky 2007 až 2012 .....	119
Tab. 38: Produkce a nakládání s kaly v ČR pro roky 2002 až 2006 .....	120
Tab. 39: Emisní limity pro stanovení $C_{proc}$ pro stacionární zdroje s výjimkou plynových turbín a plynových motorů platné do 31. 12. 2015.....	121
Tab. 40: Emisní limity pro stanovení $C_{proc}$ pro stacionární zdroje s výjimkou plynových turbín a plynových motorů platné od 1. 1. 2016, pro něž byla podána kompletní žádost do 7. 1. 2013 a byly uvedeny do provozu nejpozději do 7. 1. 2014.....	121
Tab. 41: Emisní limity pro stanovení $C_{proc}$ pro stacionární zdroje s výjimkou plynových turbín a plynových motorů platné od 1. 1. 2016, pro něž byla podána kompletní žádost od 7. 1. 2013, nebo byly uvedeny do provozu od 7. 1. 2014.....	122
Tab. 42: Vhodnost použití ohnišť pro různé druhy odpadů .....	123



# Obsah

ABSTRAKT.....	1
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	5
SEZNAM TABULEK.....	8
OBSAH.....	10
1. ÚVOD.....	14
1.1. Cíle disertační práce.....	16
1.1.1. <i>Posouzení podmínek, za kterých lze při spalování kalu uvažovat o energetickém využití kalů</i> .....	16
1.1.2. <i>Posouzení provozně technologických podmínek spoluspalování kalů s uhlím ..</i>	16
1.1.3. <i>Posouzení a výběr možných lokalit pro spalování a spoluspalování kalů v rámci ČR</i>	17
2. ODPADOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ V ČR.....	19
2.1. Charakteristiky a vznik kalu z čistíren odpadních vod.....	19
2.2. Produkce kalů v České Republice.....	23
2.3. Možnosti kalové koncovky.....	25
3. LEGISLATIVA.....	26
3.1. Aplikace na zemědělskou půdu.....	26
3.2. Ochrana ovzduší ohledně vypouštění znečišťujících látek při termickém zpracování odpadů a kalů.....	27
3.2.1. <i>Emisní limity pro spalování odpadů (kalů)</i> .....	28
3.2.2. <i>Emisní limity pro spoluspalování odpadů (kalů)</i> .....	29
4. PŘEDÚPRAVA KALU - STABILIZACE.....	31
4.1. Vápnění.....	31
4.2. Pasterizace.....	31
4.3. Aerobní stabilizace.....	32
4.4. Anaerobní stabilizace.....	32
4.5. Termická hydrolyza.....	33
5. SNÍŽENÍ OBSAHU VODY V KALU.....	36
5.1. Mechanické způsoby snižování obsahu vody v kalu.....	37
5.2. Termické způsoby snižování obsahu vody v kalu.....	39
5.2.1. <i>Nízkoteplotní pásové sušárny</i> .....	40

5.2.2.	<i>Solární sušárny</i> .....	45
6.	TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ KALŮ .....	47
6.1.	Přímé spalování kalu.....	47
6.1.1.	<i>Proces spalování</i> .....	48
6.1.2.	<i>Škodliviny ze spalování</i> .....	48
6.2.	Pyrolýza .....	49
6.3.	Zplyňování .....	50
7.	OPTIMÁLNÍ STUPEŇ VYSUŠENÍ KALU .....	51
7.1.	Výpočtový model anaerobní stabilizace kalu .....	51
7.2.	Výpočtový model kogenerační jednotky .....	53
7.3.	Výpočtový model sušárny kalu.....	53
7.3.1.	<i>Strategie výpočtu nízkoteplotní pásové sušárny</i> .....	54
7.3.2.	<i>Citlivost výpočtového modelu na změnu vstupních parametrů</i> .....	59
7.4.	Výpočtový model monospalovny kalu: .....	63
7.4.1.	<i>Složení spalin</i> .....	63
7.4.2.	<i>Bilanční výpočet spalování</i> .....	65
7.4.3.	<i>Bilanční výpočet výroby páry</i> .....	65
7.4.4.	<i>Výroba elektrické energie</i> .....	65
7.5.	Posouzení optimálního stupně vysušení kalu .....	66
7.5.1.	<i>Sestava sušárny kalu a monospalování pro menší kapacity (100 tis. EO)</i> .....	67
7.5.2.	<i>Sestava sušárny kalu a monospalování pro větší kapacity (1 mil. EO)</i> .....	70
8.	POSOUZENÍ PROVOZNĚ TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK SPOLUSPALOVÁNÍ S UHLÍM.....	72
8.1.	Varianta 1: Spoluspalování kalu společně s uhlím v poměru 1:10.....	74
8.2.	Varianta 2: Spoluspalování kalu společně s uhlím v poměru 1:1.....	75
8.3.	Varianta 3: Spoluspalování kalu společně s odpadem v poměru 1:2.....	75
8.4.	Varianta 4: Spalování kalu v separátní lince se společným využitím produkované páry (kal:uhlí=1:10) .....	76
9.	TECHNOLOGICKÉ USPOŘÁDÁNÍ KALOVÉ KONCOVKY PRO RŮZNÉ KAPACITY V ČR.....	79
9.1.	Kapacitní řešení 1: Kapacita pro lokality cca 100 tis. EO .....	79
9.1.1.	<i>Varianta 1, 1a a 1b: Anaerobní stabilizace a spalování anaerobně stabilizovaného kalu (MAS, KGJ, CEN/SCREW, DRYER, MINC)</i> .....	79

9.1.2.	<i>Varianta 2 a 2a: Anaerobní stabilizace a pyrolýza anaerobně stabilizovaného kalu (MAS, KGJ, CEN/SCREW, DRYER, PYR)</i>	80
9.1.3.	<i>Varianta 3: Přímé spalování směsného surového kalu (CEN, DRYER, MINC)</i>	81
9.2.	Výkonové porovnání kapacity pro lokality cca 10 tis. EO	81
9.3.	Kapacitní řešení 2: Kapacita pro lokality cca 1 mil. EO	84
9.3.1.	<i>Varianta 1: Anaerobní stabilizace a spalování anaerobně stabilizovaného kalu (MAS, KGJ, CEN, DRYER, MINC)</i>	84
9.3.2.	<i>Varianta 2: Anaerobní stabilizace s termickou hydrolyzou a monospalováním kalu (TAS, KGJ, CEN, TH, HCEN, DRYER, MINC)</i>	85
9.3.3.	<i>Varianta 3: Přímé spalování směsného surového (CEN, DRYER, MINC)</i>	86
9.4.	Porovnání variant kapacitního řešení 2	86
9.5.	Celkové porovnání obou kapacitních variant	88
9.6.	Kritérium porovnání variant z hlediska účinnosti produkce energií	90
10.	NÁVRH TECHNOLOGICKÉ LINKY PRO ZPRACOVÁNÍ KALŮ KAPACITY 100 TIS. EO	92
10.1.	PS01 Odvodnění a sušení kalu	92
10.2.	PS02 Spalovací zařízení a užití tepla	93
11.	NÁVRH TECHNOLOGICKÉ LINKY PRO ZPRACOVÁNÍ KALŮ KAPACITY 1 MIL. EO	94
11.1.	PS01 Odvodnění a sušení kalu	94
11.2.	PS02 Spalování kalu	95
11.2.1.	<i>Spalovací komora</i>	96
11.2.2.	<i>Dohořivací komora</i>	97
11.2.3.	<i>Parní kotel</i>	97
11.2.4.	<i>Čištění teplosměnných ploch</i>	98
11.2.5.	<i>Odpopílkování kotle</i>	98
11.2.6.	<i>Spalovací vzduch</i>	98
11.3.	PS 03 Parovodní hospodářství	99
11.4.	PS 04 Chladicí okruh	99
11.5.	PS 05 Čištění spalin	99
11.6.	PS 06 Pomocné provozy	100
11.7.	PS07 Emisní monitoring a komín	100
11.8.	PS 08 Kompresorovna	100
11.9.	PS 09 Výměňiková stanice	100

ZÁVĚR.....	102
VÝZNAM ZKRATEK A INDEXŮ.....	106
VÝZNAM VELIČIN.....	107
POUŽITÁ LITERATURA.....	108
PUBLIKAČNÍ ČINNOST.....	116
PŘÍLOHA 1: PRODUKCE ODPADŮ V ČR.....	118
PŘÍLOHA 2: PRODUKCE A NAKLÁDÁNÍ S KALY V ČR.....	119
PŘÍLOHA 3: EMISNÍ LIMITY PRO STANOVENÍ $C_{PROC}$ .....	121
PŘÍLOHA 4: ČETNOST POUŽITÍ RŮZNÝCH DRUHŮ OHNIŠŤ PRO ROZDÍLNÁ PALIVA.....	123
PŘÍLOHA 5: PARAMETRY JEDNOTKY MGW700 OD FIRMY MOTOR GAS [69].....	124
PŘÍLOHA 6: TECHNOLOGICKÉ VÝPOČETNÍ SCHÉMA PRO KAPACITY 100 TIS. EO .....	125
PŘÍLOHA 7: TECHNOLOGICKÉ VÝPOČETNÍ SCHÉMA PRO KAPACITY 1 MIL. EO .....	126
SEZNAM PŘÍLOH 8-12:.....	127

# 1. Úvod

Problematika nakládání s odpadem je celosvětovým problémem. Je prakticky nemožné najít optimální řešení (žádný odpad neprodukovat) v souvislosti s hierarchií nakládání s odpady obr. 1 určenou platnými předpisy [1]. I při maximálním pokusu o dodržení hierarchie nakládání s odpady, vznikne vždy určitá část odpadů, kterou není možné znovu využít ani recyklovat a tu je nutné ekologicky odstranit za současné produkce energie.



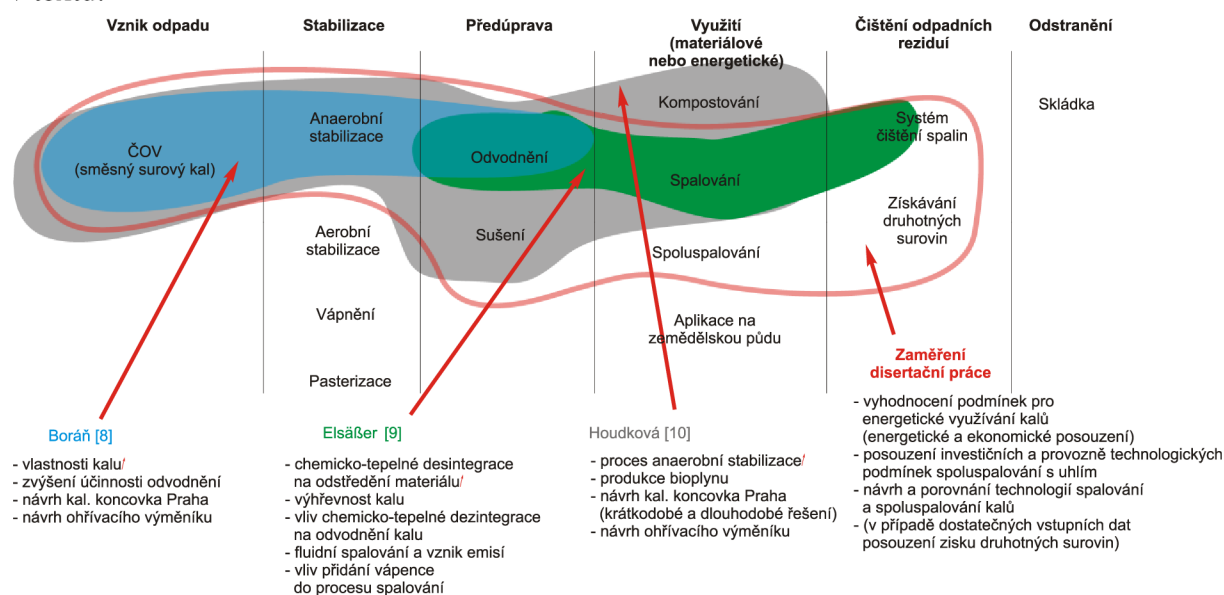
Obr. 1: Hierarchie nakládání s odpady dle [1]

V České Republice je v současné době nejrozšířenějším způsobem nakládání s odpadem skládkování. Podíl skládkování v ČR se postupně snižuje. V roce 2011 bylo skládkováno 62 % odpadů [2] a v roce 2015 to bylo 47 % komunálních odpadů [3]. Největším rizikem skládkování je negativní ekologický dopad na životní prostředí. Skládkováním odpadu dochází ke znečištění půdy a podzemních vod způsobeného průsakem odpadních vod, ke kterému dochází vlivem netěsností v izolačních vrstvách podloží skládek. Dalším negativním dopadem je znečišťování ovzduší vlivem produkce skleníkových plynů vznikajících biologickými procesy uvnitř tělesa skládky. Výše uvedené důvody jsou pouze jedny z mnoha příkladů negativních dopadů skládkování. Evropská komise proto nařídila předpisem 1999/31/EC [4], omezit skládkování biologicky rozložitelných odpadů, a to snížením jejich objemu do roku 2020 na 35 % oproti objemu skládkovaném v roce 1995 v ČR [5]). Další zpřísnění požadavků na nakládání s odpady souvisí s novelou zákona o ovzduší č. 229/2014 Sb. [6], kterou bude od roku 2024 zakázáno ukládat na skládku vybrané druhy odpadů, mezi něž budou spadat recyklovatelné a energeticky využitelné odpady. Podle návrhu komise EU jako energeticky využitelné mají být považovány odpady, které vykazují výhřevnost sušiny nad 6,5 MJ/kg, resp. nad 8 MJ/kg, což zahrnuje i kaly z ČOV [7]. Nabízí se několik možností splnění těchto cílů v podobě zvýšení opětovného využití odpadů, recyklace odpadů a energetického využití odpadů.

Kaly z čistíren odpadních vod, které jsou předmětem této práce, patří mezi odpady s vysokým podílem biologicky rozložitelné složky, přičemž výhřevnost suchého podílu kalů se pohybuje v rozmezí cca 9 až 10 MJ/kg pro anaerobně stabilizované kaly do přibližně 15 až

17 MJ/kg pro směsné surové kaly. V oblasti nakládání s kaly je v současnosti navíc možné, na rozdíl od ostatních odpadů, využití aplikace na zemědělskou půdu. Od tohoto způsobu nakládání se v Evropě upouští, přestože na ně existují přísné limity na obsah těžkých kovů (kap. 2.3). Hlavním důvodem je návrat některých škodlivých látek z kalů do půdy a tedy i plodin. Disertační práce přispívá k vytvoření výpočetního nástroje, který umožní posoudit některé možnosti využití kalorického obsahu sušiny kalu pomocí termického zpracování.

Celkový proces úpravy a nakládání s kaly se nazývá kalová koncovka. Technologickým uspořádáním kalové koncovky se zabývala již celá řada prací na výzkumném pracovišti Ústavu procesního a ekologického inženýrství (ÚPEI). Zaměření dříve vypracovaných doktorských prací a zaměření disertační práce je znázorněno na obr. 2 a je popsáno dále v textu.



Obr. 2: Zaměření předchozích disertačních prací na výzkumném pracovišti ÚPEI a znázornění zaměření disertační práce

Práce Houdkové [10] se převážně zabývá rozbořem alternativ zpracování čistírenských kalů na ÚČOV Praha. Bylo zde zmíněno několik variant a jejich investiční a technologické řešení. Autorka se zabývala i variantami spalování kalů a produkcí bioplynu z procesu anaerobní stabilizace. V práci byly zmíněny také charakteristiky a složení směsného surového a anaerobně stabilizovaného kalu, které byly získány měřeními a analýzami přímo na ÚČOV Praha. Tyto vlastnosti jsou dále shrnuty v kap.2.1. Pro disertační práci jsou především důležité údaje o chemickém složení a vlastnostech kalu a energetická náročnost a měrná produkce bioplynu z procesu anaerobní stabilizace.

Práce Elsässer [9] se zabývá převážně spalováním kalů ve fluidním loži, analýzou spalin a vlivem přidání vápence na redukci emisí. Další částí je posouzení vlivu chemicko-tepelné desintegrace na odvodnění kalu a určení některých vlastností kalu (výhřevnosti a měrné tepelné kapacity). Významnými informacemi pro budoucí disertační práci jsou převážně data o možném odvodnění kalu a data ohledně vzniklých emisí při spalování kalu ve fluidním loži.

Práce Boráně [8] zmiňuje některé varianty kalové koncovky pro ÚČOV Praha, o nichž detailně pojednává navazující práce Houdkové [10]. Práce obsahuje také výpočetní a technologický návrh výměníku pro ohřev kalu ke zvýšení účinnosti odvodnění.

## 1.1. Cíle disertační práce

Primární cíl disertační práce je návrh technologické soustavy pro zpracování kalů z čistíren odpadních vod (ČOV), které je založeno na termickém zpracování. Hlavní cíle lze shrnout takto:

- Posouzení podmínek, za kterých může soustava zařízení obsahující termický proces zpracování kalů dosáhnout energeticky soběstačný režim, eventuálně produkovat energii pro export, nebo pro zbývající provozy čistírny odpadních vod.
- Posouzení provozně technologických podmínek spoluspalování kalů s uhlím
- Posouzení a výběr možných lokalit pro spalování a spoluspalování kalů v rámci ČR

### 1.1.1. Posouzení podmínek, za kterých lze při spalování kalu uvažovat o energetickém využití kalů

Na základě výsledku předchozích prací vyplynulo, že zpracování čistírenských kalů formou termického zpracování vyžaduje jejich předúpravu ve formě snížení obsahu vody. To je docíleno mechanickým způsobem a poté sušením. Odvodněný a vysušený materiál (výhřevnost materiálu 6-10 MJ/kg v případě anaerobně stabilizovaného kalu) lze následně teprve spalovat, nicméně značný podíl uvolněného tepla je spotřebován procesem sušení.

Hlavním cílem disertační práce bylo vytvoření a analýza modelového návrhu technologické soustavy pro termické zpracování kalů z ČOV, která zahrnuje předpravu kalů, jejich sušení, následné termické zpracování a využití uvolněného tepla pro pokrytí vlastních energetických potřeb i eventuální export.

Cílem je určit, zda je taková varianta možná, případně za jakých podmínek může existovat a zda se bude ve všech případech jednat pouze o termické zneškodňování kalů s energetickým ziskem, nebo s nutností dodání energie do tohoto procesu.

### 1.1.2. Posouzení provozně technologických podmínek spoluspalování kalů s uhlím

Pro vytvoření rychlé představy a pružnou reakci při řešení studií o možnostech využití produkovaných kalů v různých lokalitách s rozdílným složením a kalorickým obsahem kalu je nezbytné vytvoření technologického návrhu linky energetického využívání kalů, včetně bilančního a ekonomického dopadu a podmínek realizovatelnosti projektu. Od okamžiku svého vzniku až po finální odstranění (resp. využití) prochází kal různými technologickými stupni. V rámci technologických zařízení je současně dopravován a pomocí technologických

procesů jsou měněny jeho vlastnosti. Aby bylo možné navrhnout vhodné technologické řešení pro spalování kalů, je nutné určit, jakým způsobem bude kal předupraven.

V této části je vhodné rozdělit úpravu kalu na dvě varianty. První varianta se týká producenta kalů, který musí kal upravit tak, aby zabránil biologickým procesům (hygienizace a stabilizace kalu) a dále s ním naložit s nejnižšími finančními náklady (cena za dopravu, cena za převzetí kalu). Druhá varianta je zaměřena na provozovatele spalovny kalů, pro kterého je nejvýhodnější získávat palivo o vysokém kalorickém obsahu za nejnižší náklady. Tyto úvahy jsou nezbytné pro další technologické návrhy a postupy výpočtu a tvoří jeden z dílčích cílů disertační práce. Navrhované varianty technologií musí splňovat veškeré předpisy a musí být v souladu s evropskými dokumenty BREF/BAT [11] a dokumenty české i evropské legislativy.

Jak již bylo výše zmíněno, z hlediska zpracovatele kalu z ČOV (v případě disertační práce zařízení na termické zpracování kalů), je vhodné posoudit, zda není výhodnější zpracovávat palivo s vyšším kalorickým obsahem. Z tohoto pohledu se nabízí varianta spalování kalu s jiným palivem s kaloricky vyšší hodnotou, tzv. spoluspalování. V případě spoluspalování se nabízí celá řada primárních paliv (např. uhlí) i druhotných paliv (směsný komunální odpad, biomasa). Pro další návrh technologií bylo zvoleno spoluspalování kalu s uhlím, při němž se nabízí využití již stávajících provozů uhelných elektráren a tepláren nebo výstavba nových zařízení, které budou využívat spoluspalování s uhlím pouze v určitém poměru. Dílčím cílem disertační práce je posoudit, zda je reálné z bilančního i ekonomického hlediska stávající energetické zařízení přizpůsobit i pro spalování kalů a jaké úpravy by bylo nutné udělat převážně v systému čištění spalin pro dodržení emisních limitů, které jsou nastaveny pro spalování odpadů výrazně přísněji než pro spalování uhlí. V souvislosti s problematikou posouzení možností spalování kalů z energetického hlediska bylo vytvořeno několik bilančních výpočtů a několik variant spoluspalování kalů, které byly součástí příspěvku na konferenci PRES 2013 [12]. Tyto výsledky jsou podrobněji popsány dále v kap.8.

### 1.1.3. Posouzení a výběr možných lokalit pro spalování a spoluspalování kalů v rámci ČR

Pro výběr vhodné lokality je důležité posouzení několika informací závislých na předchozích výstupech práce:

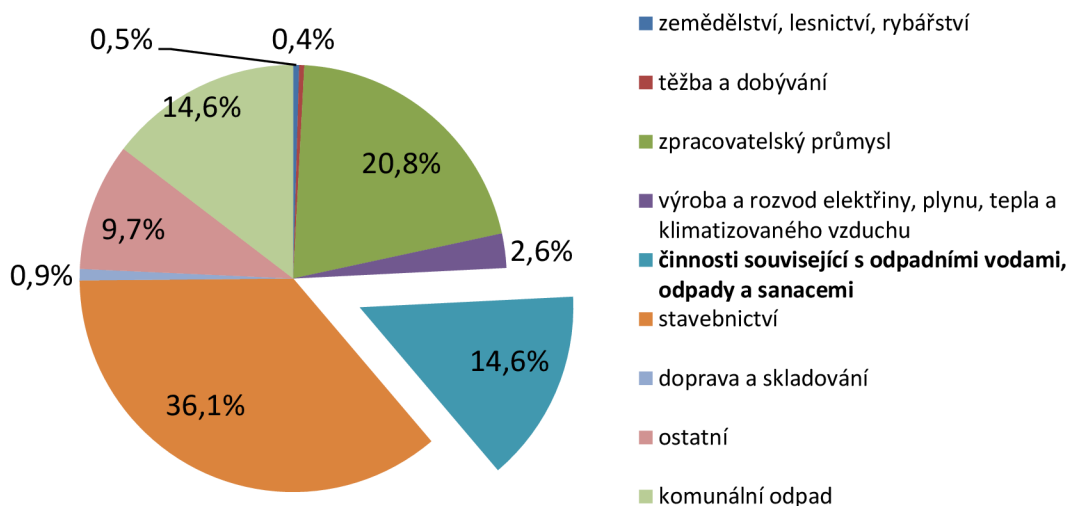
- Množství dostupného kalu v blízké oblasti vhodného pro termické zpracování
- Možnost získání levného odpadního tepla (např. elektrárna, zařízení na energetické využití odpadů) pro ohřev a předsušení kalu
- Možnost umístění zařízení do areálu většího provozu za účelem snížení výdajů na zaměstnance
- Možnost přístupu k centrálnímu zásobování teplem (CZT) pro zajištění odběru tepla



Tyto a jiné důležité parametry jsou významné z hlediska ekonomiky provozu. V rámci předchozích prací autora [13] byly již tyto vlivy posuzovány pro zařízení na energetické využívání odpadů malých kapacit (10 a 20 kt odpadu za rok).

## 2. Odpadové hospodářství v ČR

V České republice bylo za rok 2017 vyprodukováno 24 926 kt odpadu [14], z čehož 3 636 kt připadá na činnosti související s odpadními vodami, odpady a sanacemi, což tvoří 14,6 % všech produkováných odpadů (Příloha 1, tab. 36). Hlavní producenti odpadů jsou znázorněni v grafu na obr. 3.



Obr. 3: Rozložení produkce odpadů [14]

### 2.1. Charakteristiky a vznik kalu z čistíren odpadních vod

Kal je zbytkovým produktem z procesu čištění odpadních vod a jeho složení závisí na kapacitě ČOV, užívané technologii a především na druhu odpadních vod, které jsou čištěny (např. poměr a druh průmyslových objektů napojených na kanalizační systém ČOV) [15]. Schéma ČOV běžně užívaných ve větších městech je znázorněno na obr. 4, kde je výstupním odpadním produktem směsný surový kal (SSK), který vzniká promísením kalu z usazovacích nádrží (primární kal) a aktivačních nádrží (aktivovaný kal).



Obr. 4: Technologické schéma čistírny odpadních vod

Obsah sušiny v směsném surovém kalu se pohybuje v rozmezí 1 až 7 % v závislosti na zahušťovacím procesu. Obsah organických látek v sušině je okolo 70 %. Složením a vlastnostmi kalu se již zabývala celá řada prací na Ústavu procesního a ekologického inženýrství [8] a [10].

Chemické složení směsného surového kalu (SSK) a anaerobně stabilizovaného kalu (ASK) vychází z dat v (tab. 1).

Tab. 1: Chemické složení ASK a SSK [16]

Složení sušiny [%]	SSK					ASK		
	8.8.2005	9.8.2005	10.8.2005	11.8.2005	průměr	24.8.2005	25.8.2005	průměr
Hořlavina	68,45	64,05	65,63	72,15	67,57	49,63	48,78	49,21
Popeloviny	31,55	35,95	34,37	27,85	32,43	50,37	51,22	50,795
Složení hořlaviny [%]								
C	62,64	55,39	59,19	63,84	60,27	60,12	65,27	62,7
H	8,03	6,71	5,03	6,26	6,51	8,56	7,97	8,27
N	6,24	9,52	7,86	9,79	8,35	7,06	7,69	7,38
O	23,09	28,39	27,93	20,14	24,89	24,26	14,63	19,45
S	0	0	0	0	0	0	4,44	2,22

Výhřevnost kalu lze určit dvěma způsoby, laboratorními zkouškami nebo výpočtem pokud jsou známy elementární analýzy chemického složení kalu. Výhřevnost sušiny kalu z laboratorních zkoušek je uvedena v tab. 2.

Tab. 2: Výhřevnost a spalná tepla ASK a SSK [8]

Datum	SSK					ASK		
	8.8.2005	9.8.2005	10.8.2005	11.8.2005	průměr	24.8.2005	25.8.2005	průměr
Spalné teplo [MJ/kg]	16,82	15,71	15,85	17,45	16,46	12,17	12,19	12,18
Výhřevnost [MJ/kg]	15,67	14,63	14,76	16,25	15,33	11,22	11,23	11,23
Fluor [%]	0,07	0,045	0,029	0,023	0,042	0,038	0,037	0,038
Chlor [%]	0,047	0,054	0,049	0,045	0,049	0,056	0,064	0,06

Pro určení výhřevnosti kalu výpočtem existuje několik empirických vztahů [17]. Výsledky spalných tepel hořlaviny vypočítané dle jednotlivých vztahů byly uvedeny v práci Boráně [8] (tab. 3).

Tab. 3: Hodnoty spalného tepla hořlaviny kalu dle různých metod výpočtu [8]

Výpočtový vztah	Spalné teplo HHV <sub>h</sub> [kJ/kg] pro SSK	Spalné teplo HHV <sub>h</sub> [kJ/kg] pro ASK
Mendělejev	27679	28840,4
Dulong	28620,5	29609,5
Institute of gas technology	31759,5	32247,8
Strache, Lant	28779,6	29728,8
Steuer	28897,3	29736
Grummel, Daveies	27898	28885,6
Michel	29682,4	30522,3
Svazové rovnice	28608	29601
Boie	27727,4	29208,4
Schuster	28486,6	29510,3
průměrná hodnota	28814	29789

Jak je z výsledků patrné, jejich rozdíly jsou v řádech jednotek MJ/kg, proto je možné přistupovat k výpočtu výhřevnosti kalů dvěma způsoby, a to buď zvolit vhodný vztah pro výpočet a ten následně porovnat s laboratorními výsledky a získat korekční křivku pro vyrovnání hodnot, nebo zvolit vztah, u kterého je výsledná odchylka nejmenší.

Pro první případ (zvolit vhodný vztah a ten dále upravit) je postup uveden níže. Jako příklad je zvolen výpočet výhřevnosti z chemického složení kalu dle vztahu IGT [17] pro spalné teplo hořlaviny (1).

$$HHV_h [\text{kJ/kg}] = 341 \cdot C_h + 1322 \cdot H_h + 68,5 \cdot S_h - 120 \cdot (O_h - N_h) \quad (1)$$

Spalné teplo hořlaviny je dále přepočteno na spalné teplo sušiny (2) a korigováno o množství vody vzniklé oxidací vodíku v palivu. Výsledná hodnota výhřevnosti kalu je vypočtena pomocí vzorce (3).

$$HHV_{\text{suš}} [\text{kJ/kg}] = HHV_h \cdot x_{\text{suš}} \quad (2)$$

$$LHV_{\text{suš}} [\text{kJ/kg}] = HHV_{\text{suš}} - r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \left[ \frac{MW_{\text{H}_2\text{O}}}{MW_{\text{H}_2}} \cdot \left( H_h - \left( \frac{MW_{\text{H}_2}}{2 \cdot MW_{\text{Cl}}} \cdot Cl_h + \frac{MW_{\text{H}_2}}{2 \cdot MW_{\text{F}}} \cdot F_h \right) \right) \cdot x_{\text{suš}} \right] \quad (3)$$

Aby bylo možné určit výhřevnost kalu pro různý obsah sušiny kalu, byly určeny rovnice (4) a (5) udávající závislost výhřevnosti kalu na obsahu sušiny. Tyto rovnice byly určeny pomocí lineární interpolace hodnot vypočtených z rovnic (1-3) pro 3 různé obsahy sušiny kalu. Jak je patrné z grafu na obr. 5, který znázorňuje výhřevnost kalu pro rovnice (4) a (5) v porovnání s hodnotami udávanými odbornou literaturou a laboratorními výsledky, je nutné vypočtené hodnoty korigovat.

$$LHV_{\text{ASK,IGT}} [\text{MJ/kg}] = -16,614 \cdot (1 - x_{\text{suš}}) + 14,172 \quad (4)$$

$$LHV_{SSK,IGT} [\text{MJ/kg}] = -19,853 \cdot (1 - x_{\text{SUŠ}}) + 17,411 \quad (5)$$

V rámci této korekce byly určeny rovnice, které výsledky výhřevnosti dle vztahu IGT upraví na hodnoty udávané laboratorními zkouškami. Výsledné korigované vztahy udávají rovnice (6) a (7).

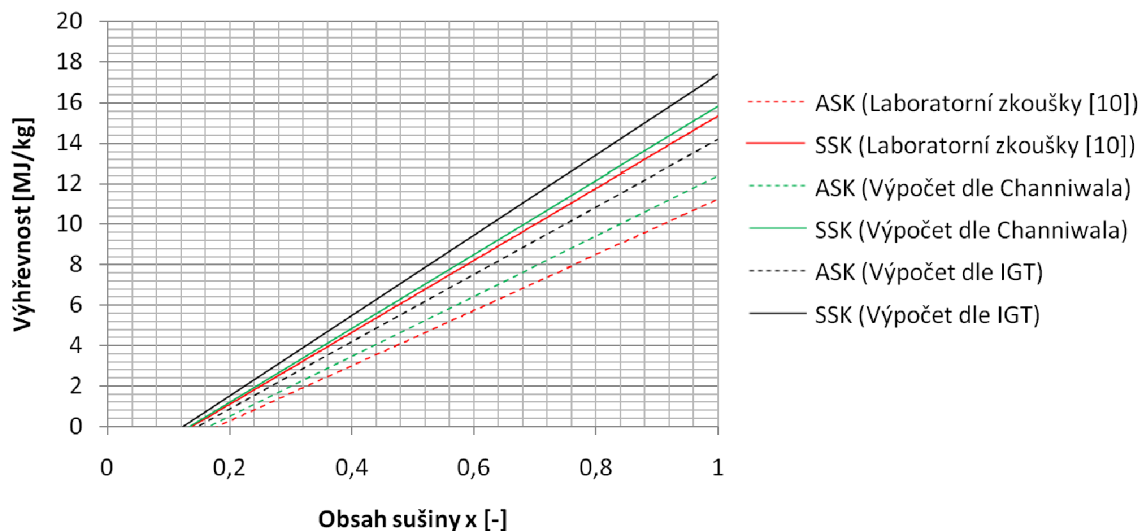
$$LHV_{ASK,IGT,kor} [\text{MJ/kg}] = \frac{(-16,614 \cdot (1 - x_{\text{SUŠ}}) + 14,172)}{(-0,2631 \cdot (1 - x_{\text{SUŠ}}) + 1,2631)} \quad (6)$$

$$LHV_{SSK,IGT,kor} [\text{MJ/kg}] = \frac{(-19,853 \cdot (1 - x_{\text{SUŠ}}) + 17,411)}{(-0,1358 \cdot (1 - x_{\text{SUŠ}}) + 1,1358)} \quad (7)$$

Je důležité zmínit, že tato korekce je použita pouze pro výpočet spalného tepla hořlaviny kalu pomocí metody IGT a pro chemické složení kalu uvedeného v tab. 2. Metoda tedy není universální a její použití je značně omezené. Z předchozího omezené možnosti použití metody IGT pro kaly a její nutné korekci vychází mnohem lépe použít výpočet dle Channiwala z roku 1992 (8) [18], který vychází srovnatelně s hodnotami naměřenými zkouškami v laboratoři. Vztah dle Channiwala udává výpočet pro spalné teplo sušiny, proto je dalším krokem přepočítání spalného tepla na výhřevnost dle vztahu (3).

$$HHV_{\text{SUŠ}} = 345,91 \cdot C_{\text{SUŠ}} + 1178,3 \cdot H_{\text{SUŠ}} - 103,4 \cdot O_{\text{SUŠ}} + 100,5 \cdot S_{\text{SUŠ}} - 15,1 \cdot N_{\text{SUŠ}} - 21,1 \cdot A_{\text{SUŠ}} \quad (8)$$

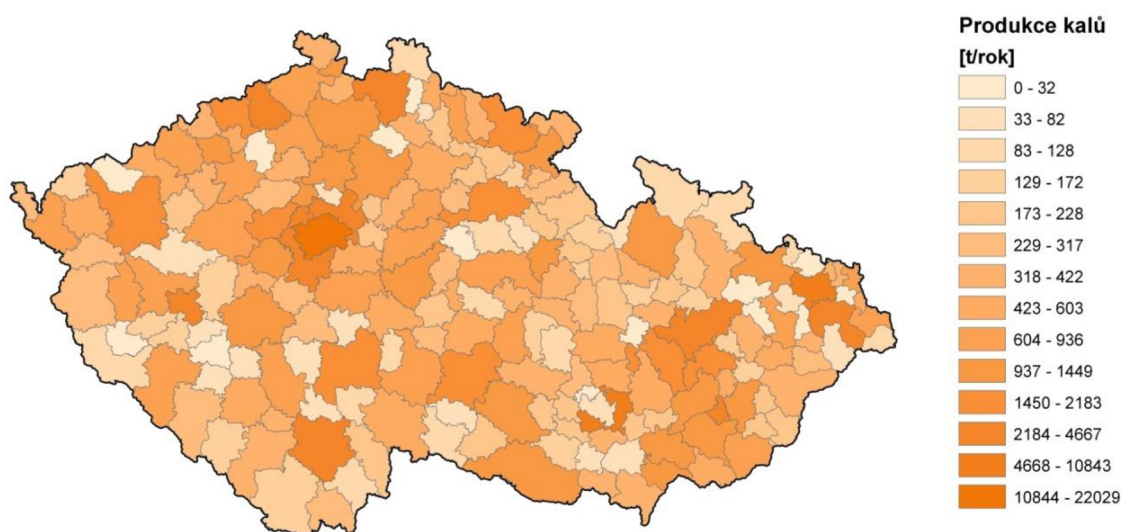
V obr. 5 je znázorněno porovnání výsledků obou možností, červeně výhřevnost dle IGT pro SSK, modře pro ASK (tečkovaná čára znázorňuje výslednou závislost po korekci, která je shodná s laboratorními výsledky) a zeleně dle Channiwala.



Obr. 5: Výhřevnost ASK a SSK v závislosti na obsahu sušiny a porovnání s hodnotami danými laboratorními zkouškami

## 2.2. Produkce kalů v České Republice

V ČR bylo za rok 2012 vyprodukováno 162 kt kalu pod katalogovým označením 190805. Rozložení produkce v jednotlivých správních obvodech ČR je znázorněno na obr. 6.



*Obr. 6: Rozložení produkce v jednotlivých správních obvodech ČR*

Produkce kalů prochází neustálými změnami, jak je patrné z dat uvedených v příloze 2 (tab. 37 a tab. 38). V budoucnu je možné předpokládat zvýšení produkce kalů vzhledem k tomu, že v roce 2012 bylo v ČR připojeno na kanalizační síť pouze 82 % obyvatel s různým procentuelním zastoupením pro jednotlivé kraje. Zvýšení produkce je závislé na vzrůstajícím množství obyvatel připojených ke kanalizační síti. Proto se dá v rámci ČR očekávat plošně nerovnoměrný vzrůst produkce kalů. Procento obyvatelstva připojeného na kanalizační síť rozděleného podle jednotlivých krajů je uvedeno v tab. 4.

Tab. 4: Množství čištěných odpadních vod v závislosti na množství obyvatel připojených na kanalizační síť [19]

Území, kraj	Podíl obyvatel bydlících v domech napojených na kanalizaci (%)	Vypouštěné odpadní vody do kanalizace celkem (tis.m3)	Podíl čištěných odpadních vod z vod vypouštěných do kanalizace (%)	Voda vypouštěná do vodních toků (tis.m3)
Česká republika	82,5	473 230	97,1	866 180
Hlavní město Praha	100,0	75 683	100,0	125 534
Středočeský kraj	68,6	51 067	99,4	77 226
Jihočeský kraj	86,7	34 884	95,3	61 423
Plzeňský kraj	79,3	29 831	95,8	50 273
Karlovarský kraj	94,2	14 678	99,6	32 308
Ústecký kraj	80,6	29 933	97,5	62 625
Liberecký kraj	66,4	14 252	98,3	43 834
Královéhradecký kraj	75,8	23 161	93,4	57 946
Pardubický kraj	72,3	21 648	98,5	40 737
Kraj Vysočina	85,9	20 089	87,1	42 602
Jihomoravský kraj	87,7	53 568	97,5	73 258
Olomoucký kraj	78,7	28 790	96,9	53 488
Zlínský kraj	90,4	27 515	95,0	45 774
Moravskoslezský kraj	82,3	48 131	96,9	99 153

V ČR bylo na ČOV v roce 2016 vyprodukováno 173,7 kt/rok sušiny kalu. Vývoj produkce kalu v ČR je uveden v tab. 5.

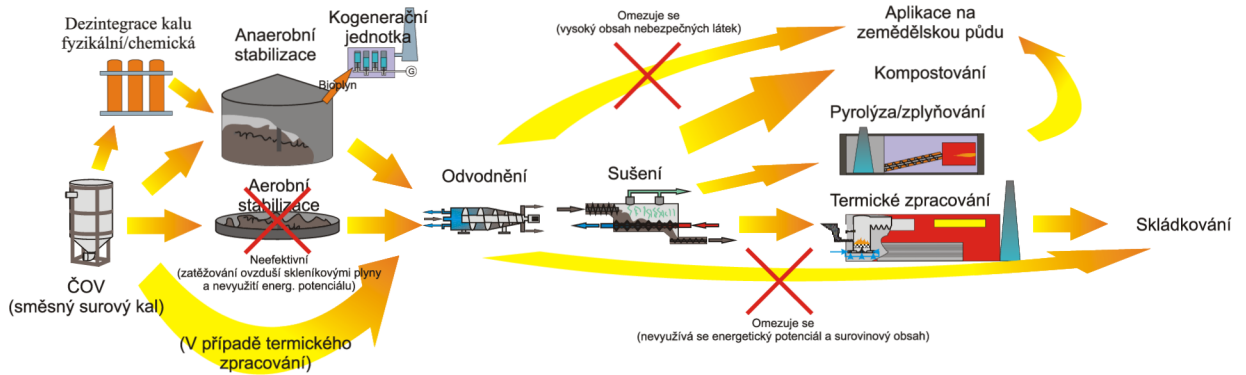
Tab. 5: Vývoj produkce kalů na ČOV a způsobu nakládání v ČR v roce 2009-2016 [19]

Rok	Kaly produkované v ČOV celkem	Způsob zneškodnění kalu				
		přímá aplikace a rekultivace	kompostování	skládkování	spalování	jinak
2016	173709	62551	65163	10183	4814	30998
2015	172997	63061	67065	6513	2167	34191
2014	159162	47830	60511	5236	3400	42185
2013	154274	54713	50384	7123	3232	38822
2012	168190	51912	53222	9340	3528	50188
2011	163818	61750	45985	9527	3538	43018
2010	170689	60639	45528	6177	3336	55009
2009	168164	42442	80727	5931	2179	36885

Výstupní SSK z ČOV je nutné dále upravovat a existuje několik možností dalšího využití nebo zneškodnění (různé varianty energetického využití, kompostování, užití jako hnojiva na zemědělské půdy, atd.). Část úpravy SSK se obecně nazývá kalová koncovka a je několik možných technologických variant, jak SSK upravit, aby se efektivně využil jeho kalorický obsah a jeho zneškodnění mělo co nejmenší environmentální dopad. Několik možností kalové koncovky pro ÚČOV Praha je popsáno v [10]. Význam a popis jednotlivých procesů je uveden dále v kap. 4 a 5.

## 2.3. Možnosti kalové koncovky

Jak již bylo zmíněno, existuje mnoho možných variant kalové koncovky, která se může skládat z kombinací různých způsobů zpracování. Možné kombinace kalových koncovek jsou znázorněny na obr. 7.



Obr. 7: Možné varianty složení kalové koncovky



## 3. Legislativa

### 3.1. Aplikace na zemědělskou půdu

Jednou z variant nakládání s čistírenskými kalů je stabilizace kalů, odvodnění a aplikace na zemědělskou půdu. Pro toto použití platí přísné limity a způsoby použití kalů na zemědělskou půdu dané vyhláškou č. 437/2016 Sb. [20] ze dne 19. prosince 2016 o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě a změně dřívějších vyhlášek č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady a změně vyhlášky č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky, které jsou plně v souladu se směrnicí EU č. 86/278/EEC [21]. Novou vyhláškou č. 437/2016 Sb. [20]. nedošlo na zpřísnění legislativních limitů z hlediska mezní hodnoty obsahu těžkých kovů a dalších kontrolovaných látek (tab. 6) oproti předchozí vyhlášce č. 383/2001 Sb. [22]. Pouze došlo k doplnění mezní hodnoty pro polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU).

Tab. 6: Mezní hodnoty koncentrací škodlivých látek pro použití na zemědělské půdě [20]

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech [mg/kg sušiny]
As – arsen	30
Cd – kadmium	5
Cr – chrom	200
Cu – měď	500
Hg – rtuť	4
Ni – nikl	100
Pb – olovo	200
Zn – zinek	2 500
AOX – absorbovatelné organické halogeny	500
PCB – polychlorované bifenylly (suma 6 kongenerů: 28 + 52 + 101 + 138 + 153 + 180)	0,6
PAU (suma antracenu, benzo(a) antracenu, benzo(b) fluoranthenu, benzo(k) fluorant Henu, benzo(a) pyrenu, benzo(ghi) perylenu, fenantrenu, fluoranthenu, chrysenu, indeno(1,2,3-cd) pyrenu, naftalenu a pyrenu)	10

Nová vyhláška zavedla povinnost ověření účinnosti technologie na kvalitu hygienizace kalů a snižování mikrobiologických polutantů. Tyto požadavky jsou součástí §10 vyhlášky 437/2016 Sb. Do roku 2020 bylo zavedeno přechodné období pro hygienizaci kalů z pohledu tzv. mikrobiologických parametrů. Mikrobiologické limity kalů kategorie I a II pro přechodné období je v tab. 7. Mikrobiologické limity od 1.1.2020 jsou v tab. 8.

Tab. 7: Mikrobiologická kritéria pro upravený kal pro aplikaci na zemědělské půdě v přechodném období do 31.12.2019 [20]

Indikátorový mikroorganismus	Jednotky	Počet zkoušených vzorků při každé kontrole výstupu	Limitní hodnota (nález/ KTJ*)	
			Kat. I	Kat. II
Salmonella spp. Termotolerantní koliformní bakterie	nález v 1g sušiny	5	negativní	
	KTJ* v 1 gramu sušiny	5	< 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>6</sup>
Enterokoky	KTJ* v 1 gramu sušiny	5	< 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>6</sup>

Pozn: \*KTJ – Kolonie tvořící jednotku

Tab. 8: Mikrobiologická kritéria pro upravený kal pro aplikaci na zemědělské půdě od 1.1.2020 [20]

Indikátorový mikroorganismus	Jednotky	Počet zkoušených vzorků při každé kontrole výstupu		Limitní hodnota (nález/ KTJ*)
Salmonella spp.	nález v 50g	5		negativní
Escherichia coli nebo enterokoky	KTJ* v 1 gramu	5	4	< 10 <sup>3</sup>
			1	< 5*10 <sup>3</sup>

Pozn: \*KTJ – Kolonie tvořící jednotku

### 3.2. Ochrana ovzduší ohledně vypouštění znečišťujících látek při termickém zpracování odpadů a kalů

V případě spalování kalů, je nutné dodržovat ustanovení vyplývající ze zákona o ochraně ovzduší a souvisejících prováděcích předpisů. Zejména zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, který vyšel v platnost dne 1. září 2012 [23] a nahrazuje mimo jiné zákon č. 86/2002 o ochraně ovzduší. V příloze č. 9 tohoto zákona jsou uvedeny sazby poplatků za znečišťování ovzduší, dále jsou v ní stanoveny emisní limity stacionárních spalovacích zdrojů. Specifické emisní limity pro odpad a další paliva jsou dány Vyhláškou č. 415/2012 Sb. [24] o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Obecně lze konstatovat, že pro velká zařízení platí přísnější emisní limity. Velká zařízení mají lepší podmínky pro optimalizaci spalovacího procesu a větší ekonomickou dostupnost sekundárních opatření pro snižování škodlivých emisí ve spalinách. Naopak emisní limity nejsou stanoveny pro malé zdroje (jmenovitý výkon < 0,2 MW) spalující biomasu, u nichž se zpravidla ekonomicky nevyplatí zařízení na odstranění NO<sub>x</sub> a SO<sub>x</sub> a často v nich tak dochází k nedokonalému spalování. Pro střední (jmenovitý výkon 0,3 – 5 MW) a velká zařízení (jmenovitý výkon 5 – 50 MW) spalující biomasu jsou uvedeny české emisní limity v tab. 9 níže.

Tab. 9: Emisní limity platné v ČR pro střední a velká spalovací zařízení spalující dřevo nebo biomasu, nekontaminovaný dřevní odpad, kůru a podobné rostlinné látky [24]

Jmenovitý tepelný výkon	Emisní limity [mg/m <sup>3</sup> ]				Referenční obsah O <sub>2</sub>
	SO <sub>x</sub> jako SO <sub>2</sub>	Nox jako NO <sub>2</sub>	CO	TZL	
0,3 MW ≤ P <sub>th</sub> ≤ 5 MW	2500	650	650	250	11
5 MW ≤ P <sub>th</sub> ≤ 50 MW	2500	650	400	150	11

Přísná legislativa v oblasti zpracování odpadů (tedy i kalů) klade na spalovny odpadů řadu náročných technologických požadavků. Na rozdíl od ostatních spalovacích procesů je u spalování odpadů vyžadováno sledování a účinné snižování více druhů polutantů. Tyto požadavky zvyšují investiční nároky provozovatelů spaloven. Například emise PCDD/F jsou produkovány většinou spalovacích zařízení, ale v české legislativě jsou omezeny pouze u spaloven, a to limitem 0,1 ng TEQ/m<sup>3</sup> daným evropskou legislativou. Provozní podmínky a emisní limity pro jednotlivé znečišťující látky při spalování odpadu jsou uvedeny v tab. 10. Legislativou jsou, kromě uvedených limitů škodlivin ve spalinách, kladeny i požadavky na vedení spalovacího procesu, kde je především požadováno dostatečné setrvání spalin při vysokých teplotách pro zajištění dokonalého spalování. Zákonem jsou stanoveny také požadavky na nakládání s odpady vzniklými zpracováním původních materiálů, na vedení a monitorování procesu termického zpracování odpadů atd. Česká legislativa je v této oblasti v souladu s evropskými emisními limity danými direktivou 2010/75/EU[25].

### 3.2.1. Emisní limity pro spalování odpadů (kalů)

Emisní limity platné v ČR stanovené pro spalování odpadů jsou, v porovnání s ostatními palivy, jedny z nejpřísnějších. Na stejné úrovni jsou pouze limity pro spalování zemního plynu (ušlechtilé palivo s nízkou produkcí emisí). Náročnost uvedených limitů je patrná při porovnání rozdílu průměrných denních hodnot emisních limitů pro odpad (tab. 10) a emisních limitů pro biomasu v [24].

Dle nového zákona č. 201/2012 Sb. o ovzduší, který vstoupil v platnost 1. září 2012 budou od 1. ledna 2014 a 2018 zpřísněny hodnoty pro ostatní paliva [24].

Tab. 10: Maximální přípustné koncentrace znečišťujících látek v emisích ze spaloven odpadů dle vyhlášky č. 415/2012 Sb.[24], respektive dle směrnice evropské komise 2010/75/EU[25], (vztaženo na suché spaliny při 0°C a 101,325 kPa, referenční obsah kyslíku 11 % obj.)

	Znečišťující látka	Jednotka	Denní průměr	Půlhodinové průměry	
				A (100 % i)	B (97 % ii)
Kontinuálně monitorované emise	TZL	[mg/m <sup>3</sup> ]	10	30	10
	TOC	[mg/ m <sup>3</sup> ]	10	20	10
	HCl	[mg/ m <sup>3</sup> ]	10	60	10
	HF	[mg/ m <sup>3</sup> ]	1	4	2
	SO <sub>2</sub>	[mg/ m <sup>3</sup> ]	50	200	50
	NO <sub>2</sub>	[mg/ m <sup>3</sup> ]	200/400 <sup>iii)</sup>	400	200
	CO	[mg/ m <sup>3</sup> ]	50	100	150
Jednorázově monitorované emise	Cd a Tl a jejich sloučeniny	[mg/ m <sup>3</sup> ]	Σ0,05		
	Hg a její sloučeniny	[mg/ m <sup>3</sup> ]	0,05		
	Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Ni, Mn, V a jejich sloučeniny	[mg/ m <sup>3</sup> ]	Σ0,5		
	Dioxiny a furany	[ng TEQ/ m <sup>3</sup> ]	0,1		

Pozn:

- i) Pro 100 % všech půlhodinových průměrů za kalendářní rok
- ii) Pro minimálně 97 % všech půlhodinových průměrů za kalendářní rok
- iii) Pro stacionární zdroje o jmenovité kapacitě do 6 t/h pro něž byla podána kompletní žádost do 28.11.2002 a byly uvedeny do provozu nejpozději do 28.12.2003

### 3.2.2. Emisní limity pro spoluspalování odpadů (kalů)

V oblasti spoluspalování odpadů jsou dány specifické limity pro spalování v cementářských pecích (tab. 11). Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně jednorázovým měřením (tab. 10) jsou pro spoluspalování odpadů v zařízeních jiných než spalovny odpadů stejné jako u spaloven odpadů. Uvedené platí jak pro spoluspalování v cementářských pecích tak pro spoluspalování v jiných zařízeních.

Tab. 11: Emisní limity pro spalování odpadů v cementářských pecích

Znečišťující látka	Jednotka	Emisní limit
TZL	[mg/ m <sup>3</sup> ]	30
TOC	[mg/ m <sup>3</sup> ]	10 <sup>ii)</sup>
HCl	[mg/ m <sup>3</sup> ]	10
HF	[mg/ m <sup>3</sup> ]	1
SO <sub>2</sub>	[mg/ m <sup>3</sup> ]	50 <sup>ii)</sup>
NO <sub>2</sub>	[mg/ m <sup>3</sup> ]	500/800 <sup>i)</sup>

Pozn:

- i) Vztahuje se na zařízení, která jsou v provozu a byla povolena do 28.12.2002 podle právních předpisů platných před 1.7.2002
- ii) V případě, že při spalování odpadu prokazatelně nevznikají emise oxidu siřičitého nebo celkového organického uhlíku spalováním odpadu, může krajský úřad stanovit emisní limity pro tyto znečišťující látky dle přílohy 8 vyhlášky č. 415/2012 Sb.

Pro spalování odpadů (kalů) v jiných zařízeních se emisní limity pro kontinuálně měřené znečišťující látky určují dle vzorce (15) [24]. Příklad a metodika určování je podrobněji popsána v [26].

$$C = \frac{(V_{\text{odpad}} \cdot C_{\text{odpad}}) + (V_{\text{proc}} \cdot C_{\text{proc}})}{(V_{\text{odpad}} + V_{\text{proc}})} \quad (9)$$

Pozn:

$V_{\text{odpad}}$ : Objem odpadního plynu vzniklého tepelným zpracováním pouze odpadu, stanovený podle odpadu s nejnižší výhřevností specifikovaného v povolení a přepočtený na příslušné podmínky stanovené ve vyhlášce č. 415/2012 Sb.[24]

Jestliže je teplo uvolňované při tepelném zpracování nebezpečného odpadu nižší než 10 % celkového tepla uvolňovaného v tomto zařízení, vypočte se hodnota  $V_{\text{odpad}}$  z (teoretického) množství odpadu, jehož spálením by se dosáhlo 90 % uvolněného tepla při stanovené hodnotě celkového uvolněného tepla.

$C_{\text{odpad}}$ : Emisní limity stanovené pro spalování odpadů

$V_{\text{proc}}$ : Objem odpadního plynu vznikajícího ve stacionárním zdroji spalování povolených paliv, stanovený na základě referenčního obsahu kyslíku, na který musí být emise přepočteny v souladu s touto vyhláškou. Pokud pro daný druh stacionárního zdroje není referenční obsah kyslíku stanoven, použije se skutečný obsah kyslíku v odpadním plynu nezředěný přídavkem vzduchu, který je pro vlastní proces nadbytečný.

$C_{\text{proc}}$ : Emisní limity uvedené dále v tab..

C: Emisní limit vztahený k referenčnímu obsahu kyslíku

Emisní limity pro stanovení  $C_{\text{proc}}$  jsou rozděleny do 3 částí:

- Pro stacionární zdroje s výjimkou plynových turbín a plynových motorů platné do 31.12.2015. Příloha 4 (tab. 39)
- Pro stacionární zdroje s výjimkou plynových turbín a plynových motorů platné od 1.1.2016, pro něž byla podána kompletní žádost do 7.1.2013 a byly uvedeny do provozu nejpozději do 7.1.2014. Příloha 4 (tab. 40)
- Pro stacionární zdroje s výjimkou plynových turbín a plynových motorů platné od 1.1.2016, pro něž byla podána kompletní žádost od 7.1.2013, nebo byly uvedeny do provozu od 7.1.2014. Příloha 4 (tab. 41)

## 4. Předúprava kalu - stabilizace

Předúprava kalu je nezbytný proces kalové koncovky, který lze rozdělit na dvě části:

- Stabilizace
- Snížení obsahu vody

Stabilizace je procesem kalové koncovky a úpravy kalů v případě, že kal není přímo spalován. Přímé spalování SSK bez procesu stabilizace má výhodu ve vyšším kalorickém obsahu paliva (výhřevnost sušeného SSK se pohybuje v rozmezí 14-16 MJ/kg) [27]. Významem stabilizace (hygienizace) je zamezení šíření bakterií a různých patogenů obsažených v kalu. Stručný význam běžně používaných procesů stabilizace je uveden dále. Metody hygienizace SSK lze rozdělit do několika skupin dle způsobu stabilizace.

- Chemické: Přidání chemického činidla (např. přidání vápna)
- Fyzikální: Změna fyzikálních podmínek kalu (Pasterizace, Termická hydrolyza)
- Biologické: Aerobní a anaerobní stabilizace

### 4.1. Vápnění

Proces vápnění je alternativou k biologickým procesům stabilizace kalu. Jedná se o dávkování páleného vápna do SSK. Účelem tohoto procesu je zvýšení kyselosti kalu na hodnoty pH vyšší než 12 na minimálně 2 hodiny [28], které zamezuje vzniku bakterií a vede ke zneškodnění patogenů. Tento proces je výhodný především z hlediska nízkých investičních nákladů a pro další zpracování pomocí spalování. Během vápnění neprobíhá rozklad organických částí v kalu a nedochází tak ke snížení kalorického obsahu sušiny jako při biologické stabilizaci. Menší nevýhodou je, že stabilizovaný kal pomocí vápnění nelze skladovat příliš dlouhou dobu, protože se časem snižuje hodnota pH a v SSK začne opět probíhat biologický rozklad.

### 4.2. Pasterizace

Proces pasterizace se vyznačuje tím, že ke zneškodnění bakterií a patogenních látek v kalu je využito zvýšení teploty. Proces pasterizace je možné aplikovat při použití kalu na zemědělské půdě a při úpravě kalu před biologickým zpracováním. Nevýhodou pasterizace je nutnost dodávky externí energie k ohřátí SSK. Další nevýhodou je, že proces pasterizace je využitelný pouze pro SSK splňující normy pro použití kalu na zemědělské půdě jako hnojivo.

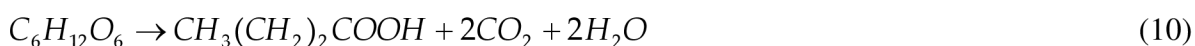
### 4.3. Aerobní stabilizace

Proces aerobní stabilizace využívá biologického rozkladu organických složek v kalu pomocí vhodných baterií a přístupu kyslíku. Při procesu aerobní stabilizace dochází převážně k exotermním reakcím při přeměně organických látek na oxid uhličitý a vodu (během reakcí se teplota v otevřené nádrži pohybuje mezi 50 až 60 °C). Aerobní stabilizace obvykle probíhá v otevřených betonových nádržích za stálého míchání kalu a v případě potřeby za občasného provzdušnění. Doba zdržení v nádržích je v rozmezí 20 až 30 dnů. Nevýhodou tohoto procesu stabilizace je nemožnost využití produkovaného tepla z tohoto procesu. Oproti anaerobní fermentaci kalu (zmiňované v kap. 4.4) má aerobní stabilizace nižší investiční náklady a zároveň menší provozní nároky na obsluhu (není nutné stavět hermeticky uzavřené zařízení a udržovat v něm optimální teplotu procesu). Z těchto důvodů je vhodná pro kapacitně malé ČOV.

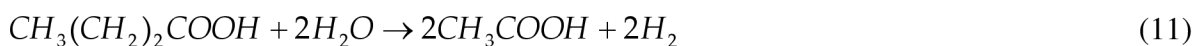
### 4.4. Anaerobní stabilizace

Proces anaerobní stabilizace je biologický proces, který vyžaduje externí dodávku energie ve formě tepelné energie pro vytvoření optimálních tepelných podmínek v reaktoru. V reaktoru probíhá chemická reakce v několika stupních, které napomáhají rozkladu organických látek.

- **Hydrolyza** je proces rozkladu makromolekulárních látek činností hydrolytických bakterií na nízko molekulární látky rozpustné ve vodě
- **Acidogeneze** je proces rozkladu produktů hydrolyzy fermentačními bakteriemi na alkoholy a mastné kyseliny za současné produkce  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  dle rovnice (10) [10]:



- **Acetogeneze** a **melanogeneze** probíhají většinou současně. Při autogenezi jsou alkoholy a mastné kyseliny rozkládány na kyselinu octovou dle rovnice (11). Při melanogenezi je kyselina octová rozkládána na metan a oxid uhličitý za vzniku metanu z vodíku a oxidu uhličitého dle rovnic (12) a (13):



Primárním účelem procesu anaerobní stabilizace je hygienizace kalu a také produkce bioplynu, který se dá dále energeticky využívat. Odpadním produktem z tohoto procesu je anaerobně stabilizovaný kal (ASK).

Z hlediska energetické bilance lze s dobrou přesností použít typické hodnoty měrné tvorby bioplynu vytvořeného na hmotnostní jednotku organického podílu vstupujícího do procesu anaerobní fermentace. Důležitá je také jeho kvalita a množství externí energie, které je nutné do procesu dodat. Energetická bilance je jedním z důležitých vstupů do celkového bilančního výpočtu. Výsledkem bilance je posuzováno, zda je energeticky výhodnější spalovat přímo SSK, nebo využít procesu anaerobní stabilizace k produkci bioplynu a jeho následného využití v kogeneračních jednotkách a spalovat pak dále ASK, který má oproti SSK nižší kalorický obsah (větší množství organických látek je použito pro výrobu bioplynu).

V práci Houdkové [10] je uvedena bilance anaerobní stabilizace a výpočet, který uvádí měrnou produkci bioplynu  $0,62 \text{ m}_N^3/\text{kg}$  organických látek. Předpokládaným rozšířením dle projektu „Celková přestavba a rozšíření ÚČOV Praha na Císařském ostrově“ byla vypočtena předpokládaná měrná produkce bioplynu  $0,64 \text{ m}_N^3/\text{kg}$  organických látek. Jak uvádí autorka [10], v případě rekonstrukce kalového hospodářství ÚČOV budou stávající nemíchané nádrže druhého stupně osazeny míchadly, což by mohlo přinést další rozklad organických látek. Dále také bude pravděpodobně navýšen počet vyhnívacích nádrží tak, aby mohla být doba zdržení kalu v nádržích delší.

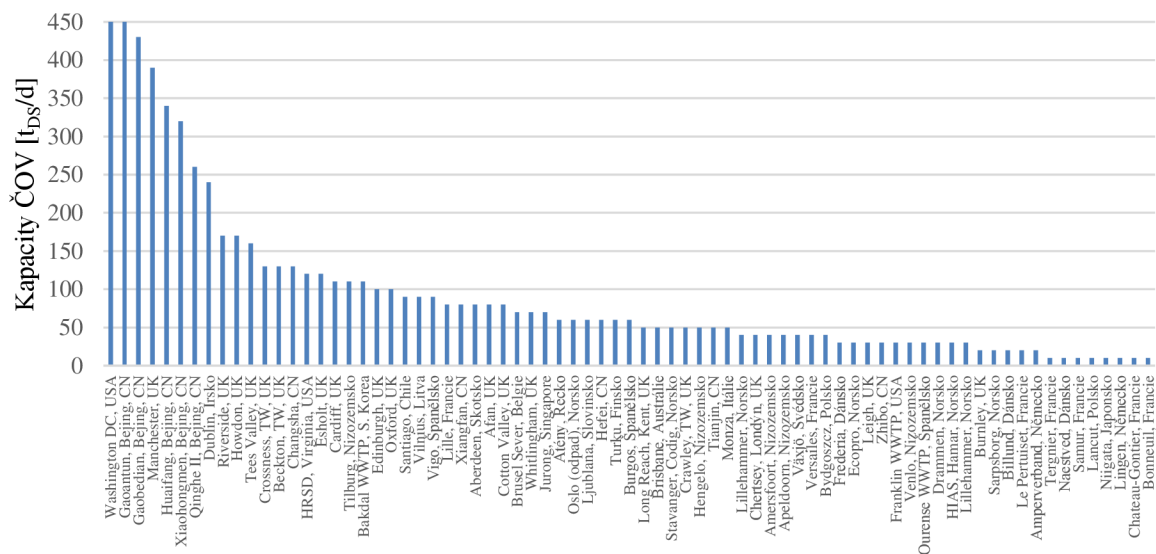
Celková bilance procesu anaerobní stabilizace je popsána v kap 7.1.

## 4.5. Termická hydrolýza

Termická hydrolýza je proces, kdy dochází k rozkladu organických materiálů na jednodušší a lépe rozložitelné materiály (jedná se o složky organického kalu, které není možné rozložit pomocí klasického anaerobního rozkladu, případně by trval příliš dlouhou dobu) pomocí působení vyšších teplot až  $170 \text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku 10 bar.

Procesem termické hydrolýzy se v současné době zabývá několik firem a výzkumných týmů ve světě [29], [30] a [31]. Jedná se o výhodné řešení pro velké čistírny odpadních vod [32], jak zvýšit produkci bioplynu ve vyhnívacích nádržích, snížit produkci sušiny vyhnílého kalu, zlepšit jeho odvodnitelnost a zmenšit potřebnou kapacitu vyhnívacích nádrží [33]. Kapacity využívající termickou hydrolýzu v roce 2016 jsou znázorněny v grafu na obr. 8.



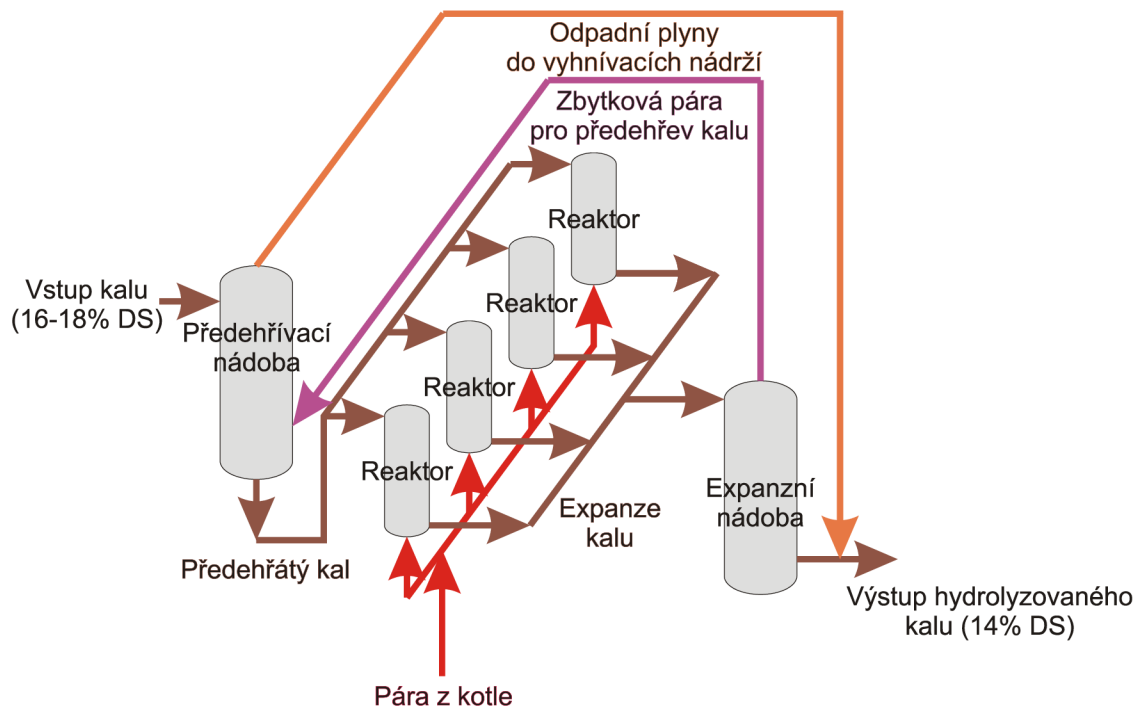


Obr. 8: Použití termické hydrolyzy ve světě v roce 2016 [34]

Existuje několik možností aplikace technologie termické hydrolyzy v procesu kalové koncovky:

- pouze na přebytečný kal před vyhnívacími nádržemi,
- na veškerý vstupní kal před vyhnívacími nádržemi,
- mezi prvním a druhým stupněm vyhnívání,
- za vyhnívací nádrže s tím, že centrát z odvodnění za termickou hydrolyzou je vrácen zpět do vyhnívacích nádrží.

Schéma procesu je znázorněno na obr. 9. Nejdůležitější částí termické hydrolyzy jsou 3 nádrže (vstupní nádrž, reaktor a expanzní nádrž) První nádrž (vstupní) slouží pro přehřátí vstupního kalu pomocí zbytkové páry z reaktoru a expanzní nádrže. Slouží tedy k využití odpadní energie z následujících procesů termické hydrolyzy a jako vyrovnávací zásobník pro reaktor, který nepracuje kontinuálně, ale v cyklech. Za vstupní nádrží následuje reaktor, kde po jeho naplnění přehřátým kallem dochází k zahřátí párou až do dosažení provozních parametrů (teploty 150-165 °C a tlaku 5-10 bar).



Obr. 9: Technologické schéma termické hydrolyzy od firmy Cambi [35]

Po dodržení doby setrvání dle technologického návrhu dochází k uvolnění přebytečné páry do vstupní nádrže a přečerpání kalu do expanzní nádrže. V expanzní nádrži dochází ke snížení tlaku a teploty kalu. Po snížení tlaku má kal teplotu okolo 105 °C. Pára uvolněná v expanzní nádobě je vrácena zpět do vstupní nádrže, kde se využívá pro přehřev kalu.

## 5. Snížení obsahu vody v kalu

Další nezbytnou částí procesu úpravy kalu je co nejvyšší snížení obsahu vody a tím i snížení množství kalu, který je nutné dále zpracovávat. Obsah vody v kalu ovlivňuje převážně množství kalu, nikoli množství produkované sušiny. V případě transportu, byť jen v areálu ČOV, každé nadbytečné procento vody zvyšuje náklady na dopravu, skladování nebo poplatky za ukládání na skládky.

Proces snížení obsahu vody je obvykle primárně prováděn ve dvou stupních (mechanického a termického způsobu). Pomocí mechanického odvodnění je dosahováno zahuštění kalu až na 30-40 % sušiny kalu [37]. Pro další snižování obsahu vody se využívá termického sušení až na 80-95 % sušiny kalu. K mechanickému odvodnění se využívají odstředivky, pásové lisy nebo kalolisy [38]. Porovnání mezi odstředivkou a šroubovým lisem z hlediska spotřeby elektrické energie je uvedeno v tab. 12. Pro porovnání jsou zde uvedeny odstředivka a šroubový lis o podobném zpracovatelském výkonu a menší odstředivka, která i přes poloviční kapacitu má vyšší spotřebu než při použití šroubového lisu.

Tab. 12: Srovnání elektrických spotřeb odstředivky a šroubového lisu [36] a [39]

Zařízení	množství sušiny [kg/h]	Množství kalu [m <sup>3</sup> /h]	hlavní pohon [kWh/h]	vedlejší pohony [kWh/h]	Provozní spotřeba [kWh/h]
Odstředivka	300	6-15	30	7,5	14
Odstředivka	120	4	15	5,5	8
Šroubový lis	200	2-10	2,2	0,37	2

Zvýšení účinnosti odvodnění lze dosáhnout pomocí fyzikálních nebo chemických postupů uvedených v práci Elsäßera [9]. Stupeň odvodnění se obvykle pohybuje v rozmezí 16 až 30 % sušiny. V práci Houdkové [10] je odvodnění kalu až na 33 % sušiny za pomoci vhodných flokulantů. Na ČOV v Brně-Modřicích udávají obsah sušiny pomocí mechanických odstředivek zhruba 24 % sušiny v odvodněném kalu [40]. Porovnání výhod a nevýhod jednotlivých technologií odvodnění je uvedeno v tab. 13 [41].

Dalšího zvýšení obsahu sušiny v SSK nebo ASK lze docílit procesem sušení. Procesu sušení je věnována kap. 5.2. Proces sušení vyžaduje dodávku externí tepelné energie. V tomto případě je nutné posoudit, zda je možné tuto energii výhodně získat nebo lze alespoň částečně využít odpadního tepla z jiných procesů. V případě, že se zdroj externí tepelné energie v blízkosti technologie nenachází, je nutné k sušení použít tepelnou energii vyrobenou z primárních zdrojů. Využití primárních zdrojů je nezbytné posoudit z ekonomického hlediska a z hlediska vlivu na životní prostředí.

Tab. 13: Porovnání výhod a nevýhod zařízení pro mechanické odvodnění kalu

Technologie odvodňování	Výhody	Nevýhody
Sítopásové filtrační lisy	<p>Produkce relativně vysoké sušiny kalu</p> <p>Střední energetická náročnost</p> <p>Relativně nízké investiční a provozní náklady</p>	<p>Větší komplex pro přípravu kalu a dodatečné nádrže, míchadla</p> <p>Vyšší častější zásah údržby</p> <p>Zařízení zabírá větší plochu</p> <p>Vysoká produkce zápachu</p>
Odstředivky	<p>Čistý provoz, nízká produkce zápachu, schopnost rychlého start a stop</p> <p>Vyšší koncentrace kalové sušiny kalu</p> <p>Vysoká kapacita na plochu budovy</p> <p>Kontinuální provoz</p>	<p>Náklady na údržbu jsou vysoké (opravy rotoru)</p> <p>Kvalitní personál je nezbytný</p> <p>Vysoká energetická náročnost</p> <p>Závislost odvodnění na kvalitě kalu</p>
Šroubové rotační lisy	<p>Plně uzavřené řešení s nízkou produkcí zápachu</p> <p>Minimální požadavky na pozornost operátora</p> <p>Nízké provozní náklady</p> <p>Nízká spotřeba elektrické energie</p>	<p>Nižší sušina odvodněného kalu</p> <p>Potřeba čištění síta (ostřík)</p> <p>Střední náročnost na plochu</p> <p>Vyšší recirkulace sušiny</p>

## 5.1. Mechanické způsoby snižování obsahu vody v kalu

Pásové lisy jsou zařízení pro odvodnění kalu, u kterých je zvýšení sušiny kalu docíleno vytlačováním vody přes pásy. Zařízení se skládá ze dvou pásů a několika válců. Kal rovnoměrně dávkuje na spodní pás, poté je překryt vrchním pásem a prochází soustavou válců, které vytlačují vodu z kalu přes pásy. Na konci dochází k rozevření pásů od sebe, výpadu odvodněného kalu a seškrábnutí zbylého kalu z pásů. Voda je z kalu vytlačována tlakem až 20 bar. Příklad pásového lisu je na obr.10 Na výstupu je dosahováno 20-35 % sušiny kalu dle složení vstupního kalu, množství a druhu použitého flokulantu.



Obr.10: Sítopásový lis od firmy Sülzle Klein [42]

Šroubové lisy jsou alternativou k pásovým lisům a jsou vhodné pro nižší kapacity. Kal vstupuje do prostoru mezi tělo šroubovice a kovová síta okolo. V první polovině lisu je kal odvodňován prakticky gravitačně pouze s mírným přetlakem a vnitřní šneková hřídel slouží pouze k posuvu kalu uvnitř šroubového lisu. V druhé polovině lisu se prostor mezi šroubovicí a okolními síty zmenšuje a dochází k zvýšení tlaku. Na výstupu odvodněného kalu je umístěn pneumaticky ovládaný plastový kužel, který pomocí přítlaku řídí provozní tlak uvnitř lisu. Na obr. 11 je příklad šroubového lisu od firmy Sülzle Klein. Jsou zde vidět jemná ocelová síta obklopující šroubovici a ostříkovací mechanismus pro pravidelné čištění sít. Na obr. 12 je fotografie šroubového lisu od firmy Hüber. Na výstupu z lisu je dosahováno 18-28 % sušiny kalu v závislosti na složení vstupního kalu, množství a druhu použitého flokulantu.



*Obr. 11: Šroubový lis bez krytů*

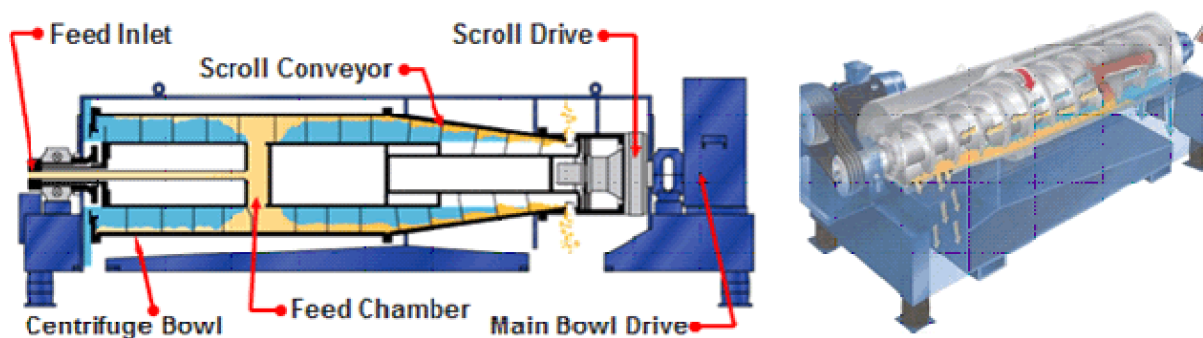




*Obr. 12: Šroubový lis používaný na odvodnění kalu před vstupem do solární sušárny*

Odstředivky jsou vysokootáčková rotační zařízení, kde dochází k separaci vody z kalu působením rozdílně velkých odstředivých sil na pevné částice a vodu.

Odstředivka se skládá z rotoru (bubnu) a vnitřního šneku. Vnitřní šnek se otáčí mírně odlišnou rychlostí než bubna. Rozdílné rychlosti otáčení bubny a vnitřního šneku ovlivňují kvalitu výstupního centrátu z odstředivky (množství pevných částic, které zůstávají v separované vodě). Vnitřní šnek slouží pro vynášení pevných částic z odstředivky. Při příliš malých otáčkách šneku není množství odváděných pevných částic dostatečné a přebytečné částice jsou odváděny v centrátu. V případě příliš velké rychlosti šneku se zase zhorší kvalita výstupu odvodněného kalu. Řez odstředivkou je znázorněn na obr. 13 [43].



*Obr. 13: Vnitřní uspořádání odstředivky [43]*

## 5.2. Termické způsoby snižování obsahu vody v kalu

Pro snížení množství produkovaného odpadu a jeho hygienizaci před následným zpracováním (spalování, pyrolýza, atd.) se využívají termické způsoby snižování obsahu vody v kalu.

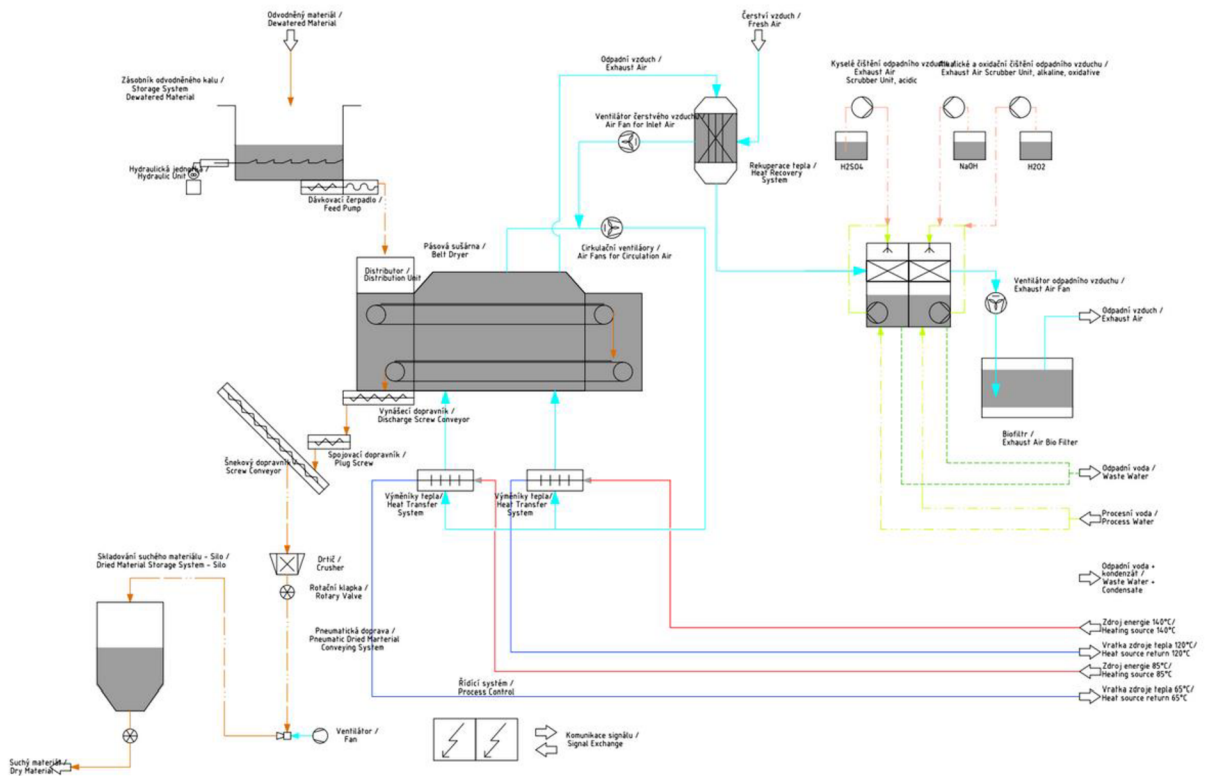
- Nízkoteplotní: Nízkoteplotní pásové sušárny (teplota sušení do 100 °C), solární sušárny
- Středně a vysokoteplotní: Pásové sušárny (teplota sušení nad 100 °C), diskové sušárny, sušení v rotační peci (300-350 °C) [40], fluidní sušárny

### 5.2.1. Nízkoteplotní pásové sušárny

Jednou z možností použití technologie nízkoteplotního pásového sušení. V předložené technicko-ekonomické rozvaze je pro proces sušení odvodněného kalu uvažováno s použitím nízkoteplotní sušárny a z tohoto důvodu je popis této technologie proveden detailněji.

Vysušením kalu z 30 %DS na 90 %DS je dosaženo výrazné snížení produkovaného množství kalu o cca 75 % hmotnosti, dochází k jeho dobré hygienizaci a splnění podmínek pro hygienizovaný kal kat. I (dle vyhl. č. 437/2016 Sb. [20] uvedené v kap. 3.1) pro použití kalu na zemědělské půdě. Při správném uskladnění nedochází u produkovaného kalu ke zpětné samovolné kontaminaci a kal vydrží hygienizován několik měsíců a je možné ho skladovat, než nastane období, kdy je kal možné aplikovat na zemědělskou půdu. V případě využití sušeného kalu jako paliva v termickém procesu je hlavním účelem sušárny zvýšení výhřevnosti kalu, aby mohl kal samovolně hořet bez nutnosti využití dalšího podpůrného paliva (výhřevnost vysušeného kalu na 90 % sušiny u anaerobně stabilizovaného kalu je v rozmezí 9-11 MJ/kg kalu a směsného surového kalu 14-16 MJ/kg). Vysušený kal má konstantní granulometrii s nízkým podílem prachových částic, protože na sušený kal nepůsobí žádné tlakové síly, které by vytvořené větší částice drtily.

Proces nízkoteplotního sušení se skládá z postupného odpařování vody z odvodněného kalu (cca 18-30 % sušiny kalu) až do obsahu okolo 90 % sušiny. Sušení je docíleno částečnou cirkulací sušícího vzduchu (teplota vzduchu na vstupu do sušárny je okolo 80 °C) a odvodem určitého množství vlhkého vzduchu. Jako zdroj tepelné energie pro ohřev sušícího vzduchu se obvykle využívá odpadní tepelné energie z kogeneračních jednotek o teplotním spádu 90/70°C. Moderní jednotky pásových sušáren jsou při správném návrhu schopné využívat i vyššího teplotního spádu, např. 140/120 °C, nebo kombinaci obou potenciálů (viz. Příklad technologické schéma na obr. 14 z provozu sušárny na čistírně odpadních vod v německém Koblenz). Využití zdroje tepla o vyšším teplotním spádu má za následek lepší proces sušení a tím i zmenšení velikosti sušárny. I přes výhody použití vyššího teplotního spádu, nebude tomuto řešení dále v práci věnována pozornost.



Obr. 14: Technologické schéma nízkoteplotní pásové sušárny s využitím dvou rozdílných tepelných spádů pro ohřev vzduchu uvnitř sušárny

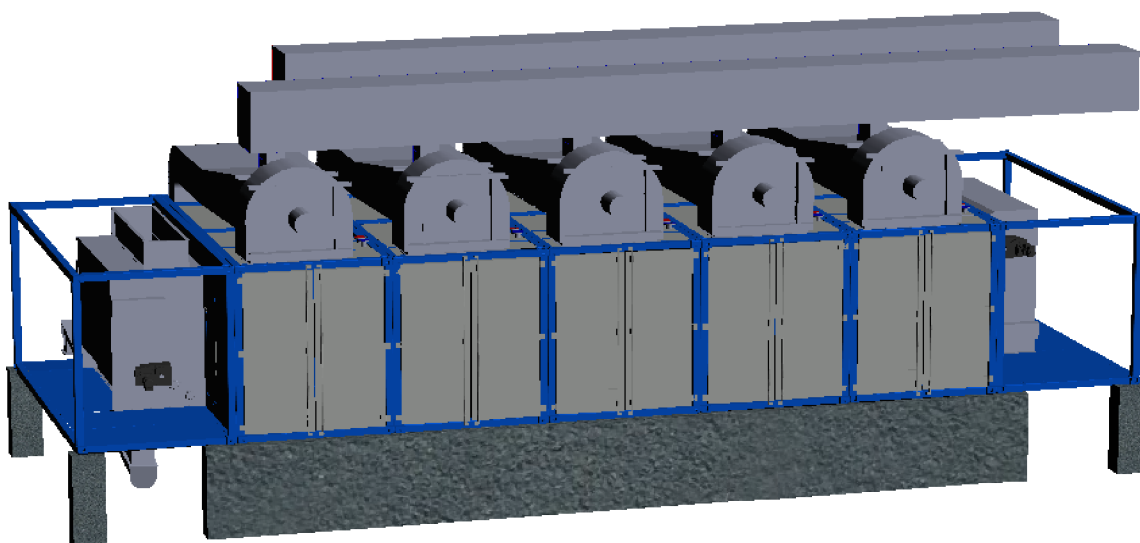
Bunkry na kal se dělí na dvě hlavní skupiny, nadzemní a podzemní. Podzemní bunkr se využívá v situacích, kde se očekává, že část kalu pro sušení bude dovážena z jiné ČOV. Příklad nadzemního bunkru je na obr. 15. Technologická část zařízení pro příjem, skladování a doprava kalu se skládá z dopravníku kalu do bunkru, otevíracími vraty stropu bunkru pro možnost násypu kalu z dovozu (obvykle podzemní bunkr), samotného zásobníku na odvodněný kal (betonový nebo ocelový kalový bunkr) s hydraulicky posuvným dnem pro snadné vyprazdňování a dávkování kalu na dávkovací čerpadlo (většinou excentrické šnekové nebo pístové čerpadlo) do vstupu sušárny. Kapacita bunkru se většinou dimenzuje na 4-7denní výkon pro případ pokrytí odstávky sušárny kalu.





*Obr. 15: Betonový bunkr na odvodněný kal s hydraulickou jednotkou a čerpadlem kalu*

Velikost sušárny se obvykle dimenzuje dle efektivní plochy sušícího pásu, tedy jaké množství vody je možné odpařit na 1 m<sup>2</sup> pásu. Množství odpařené vody je závislé na vnitřní teplotě vzduchu uvnitř sušárny. Při vstupní teplotě sušícího vzduchu 80 °C před kontaktem s kalem je zařízení navrhováno s výparným množstvím okolo 16 kg/(m<sup>2</sup>h) efektivní plochy pásu. Model sušárny kalu je zobrazen na obr. 16. Zařízení sušárny je rozděleno do 3 hlavních částí.



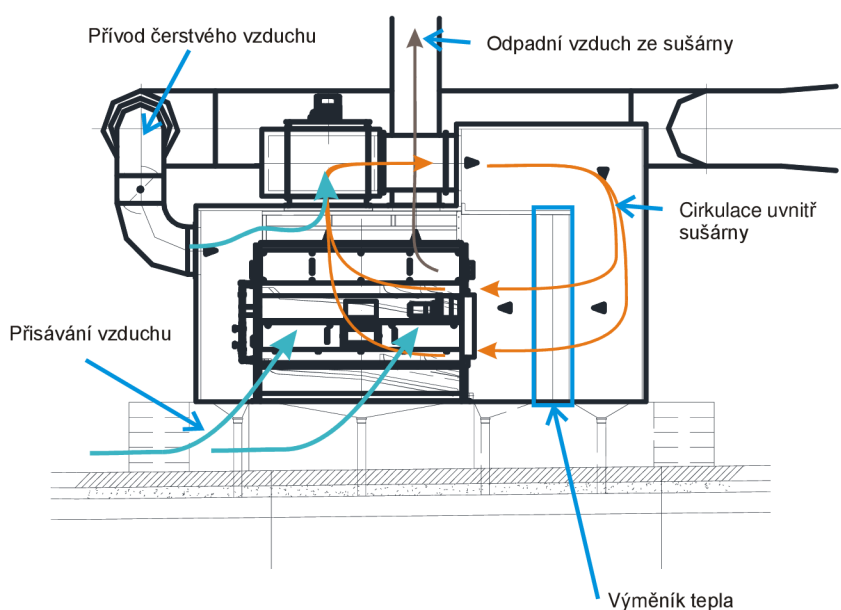
*Obr. 16: 3D model pásové sušárny kalu*

První částí je segment určený k podávání a vynášení kalů ze sušárny. Vstup kalu do sušárny začíná distributorem sloužícím pro rovnoměrné dávkování kalu na pás. Distributor se skládá ze šnekovnice, na konci umístěným řezacím nožem a děrovanou maticí. Zabudovaný nůž současně odřezává částice nečistot uvázné v otvorech matrice, které se pak následně protlačí s kalem. Součástí vstupního segmentu jsou válce s motorem a napínacím mechanismem pro sušící pásy a vynášecí šnekový dopravník, který slouží k odvodu suchého kalu ze sušárny.

Druhou částí jsou mezilehlé segmenty určené jako hlavní těleso sušárny. Jsou vybavené mechanickým systémem vedení a podepření pásu tvořeného válečky, tepelným výměníkem pro dohřev vzduchu před vstupem do prostoru s pásy a na nich rozprostřeným kalem a bezpečnostním skrápěcím systémem pro případ vznícení kalu.

Koncovou částí je předávací segment sloužící pro přechod z vrchního pásu na spodní. Je zde umístěn drtič pro částečné rozmělnění a rovnoměrné rozprostření kalu na spodní pás.

Rozvod vzduchu obsahuje několik důležitých zařízení, ventilátory pro přívod čerstvého vzduchu, cirkulaci vzduchu a odvod odpadního vzduchu, tepelný výměník pro předeřev čerstvého vzduchu odcházejícím odpadním vzduchem a čištění odpadního vzduchu pomocí chemické pračky plynů (kyselo/zásadité) a biofiltru. Toky vzduchu a směr proudění vzduchu v sušárně je znázorněn a popsán na řezu v obr. 17.



Obr. 17: Proudění vzduchu uvnitř bloku sušárny

Přívod čerstvého vzduchu bývá řešen ze dvou zdrojů. Prvním zdrojem je nasávání teplého vzduchu z prostředí budovy sušárny. Sáním teplého vzduchu z haly sušárny dochází ke snižování teploty v hale v letních měsících a v zimním období je toto řešení výhodné kvůli částečnému využití tepelných ztrát sušárny, které částečně ohřívají vzduch v hale sušárny. Nevýhodou tohoto řešení je významné snižování teploty uvnitř haly v zimním období. Při nízkých venkovních teplotách veškeré množství vzduchu nasávané sušárnou se musí do haly

přivést z vnějšího okolí a pomocí topení dohřívát vzduch uvnitř haly, aby bylo docíleno minimální teploty uvnitř haly. Proto je využíváno druhé možnosti sání čerstvého vzduchu, z vnějšku budovy. V případě velmi nízkých venkovních teplot je upraven poměr sání mezi proudem vzduchu z vnitřku haly a proudem vzduchu z vnějšího okolí. Změnou poměru průtoků se sníží ochlazování teploty uvnitř haly, ale za cenu zvýšení spotřeby tepelné energie v sušárně.

Neutralizace odplynu ze sušárny kalů je řešeno pomocí dvoustupňové absorpce. I. stupeň je kyselý a je řešen pomocí absorbéru. Je zde neutralizován čpavek pomocí roztoku kyseliny sírové dle rovnic (14) a (15).



V závislosti na velikosti se používají 3 patra pohyblivé náplně, které mají samočisticí efekt pro případné prachové úlety. Plyn dále prostupuje přes lamelový odlučovač kapek do II. zásaditého stupně pro redukci sirovodíku. Ve druhém stupni jsou využívána 2 činidla (hydroxid sodný a peroxid vodíku). Průběh reakcí ve druhém stupni lze zapsat rovnicemi (16) – (18).



Druhý stupeň je tvořen laminárním absorbérem se stacionární náplní. Plyn jde znovu přes odlučovač kapek do ventilátoru a dalšího stupně čištění.

Posledním stupněm čištění je biofiltr, kde dochází k rozkladu a pohlcování zbytkových pachových látek, které zůstaly v odpadním vzduchu za chemickým čištěním (například methylmerkaptany, na které není chemické čištění účinné a odstraňují se až v biofiltru). Plocha biofiltru se obvykle dimenzuje na měrné zatížení odpadním vzduchem mezi 100-150 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h.

Vynášení suchého materiálu ze sušárny je řešeno pomocí vzduchem chlazeného šnekového dopravníku s navazujícím turniketovým uzávěrem a drtičem, který rozmělní výstupní kal na velikost granulátu cca 2-4 mm. Následuje pneumatická doprava do sila, které je vzhledem k mezi výbušnosti materiálu udržováno v ochranné atmosféře dusíku, aby celková koncentrace kyslíku byla nižší než 8 %. Celé silo je navrhováno s tepelnou izolací jako opatření proti přehřívání (hrozící výbuch) nebo zamrzání kalu (kal stále obsahuje okolo 10 % vody).

### 5.2.2. Solární sušárny

Solární sušárny jsou alternativou k nízkoteplotním pásovým sušárnám menších kapacit. Dle provozních zkušeností se navrhuje potřebná plocha sušárny podle výparného výkonu na 700-800 kg/m<sup>2</sup> za rok. Solární sušárna je tvořena z betonové nebo asfaltové plochy ohraničené betonovými panely. Betonové panely slouží pro ohraničení plochy pro sušení kalu a také jako vedení pro přeřabovací jednotku a základ pro konstrukci vrchní části sušárny. Vrchní část je tvořena z ocelové konstrukce a pokryta průhlednou UV záření odolnou fólií ve dvou vrstvách, mezi které je vháněn vzduch. V horní části sušárny jsou automaticky ovládaná výklopná okna pro vypouštění vlhkého vzduchu. Pro podpoření proudění vzduchu v sušárně slouží na konstrukci zavěšené ventilátory. Celé zařízení sušárny je na obr. 19 a na obr. 18 je vnitřek sušárny s přeřabovacím zařízením.



*Obr. 18: Vnitřní prostor solární sušárny s přeřabovacím zařízením*





*Obr. 19: Solární sušárna na ČOV ve městě Lancut v Polsku*

## 6. Termické zpracování kalů

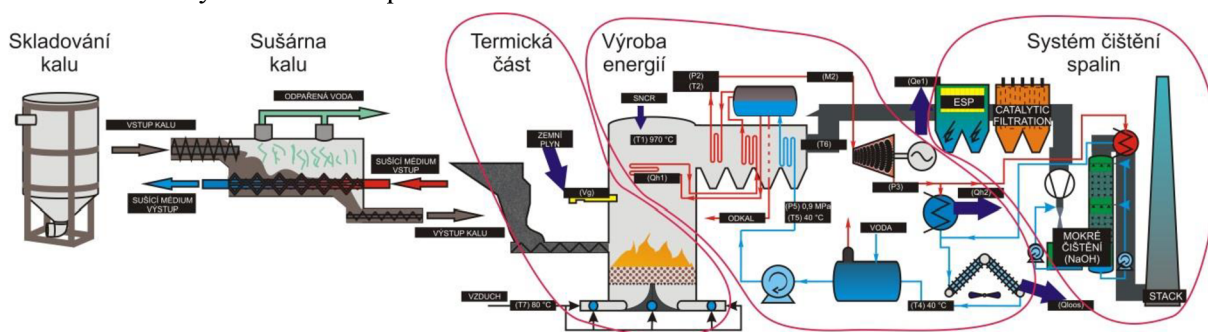
Termické zpracování kalů je možností, jak energeticky využít zbytkový kalorický obsah v kalu a získat z něho energii ve formě tepla nebo elektrické energie. V současné době existuje několik možností termického zpracování. Mezi nejrozšířenější technologie lze zařadit monospalování kalu (přímé spalování vysušeného kalu), pyrolýzu nebo zplyňování [44] a [45]. V případě procesu pyrolýzy nebo zplyňování se využívá teplotního rozkladu kalu bez přístupu kyslíku nebo s podstechiomrickým množstvím kyslíku. Tímto způsobem dochází k přechodu prchavých látek a částečně uhlíku z kalu do plynu, který je dále zpracováván v závislosti na zvolené technologii.

### 6.1. Přímé spalování kalu

Spalování kalů je jednou z možností energetického využití zbývajících kalorického obsahu v ASK nebo SSK a snížení objemového a hmotnostního množství kalů ukládaného na skládky. Z pohledu spalování kalů je nejvýraznějším parametrem obsah sušiny, který ovlivňuje celkový kalorický obsah kalu, čímž je ovlivněna výhřevnost. Výrazně nižší vliv na výpočet výhřevnosti má obsah organických látek v sušině. Přestože byla problematika závislosti obsahu sušiny na výhřevnosti řešena již v několika pracích [9], [10] a [46], nebyly určeny podmínky, za kterých může být spalování kalu procesem energeticky soběstačným, případně procesem energií produkujícím. Vytvoření těchto základních předpokladů souvisí s předchozí kapitolou (kap. 5) a je jedním z cílů disertační práce.

Technologické zařízení pro termické zpracování kalů lze rozdělit na několik částí:

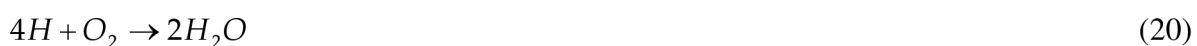
- Skladování paliva
- Předúprava paliva
- Termická část zpracování kalu
- Výroba energií
- Systém čištění spalin



Obr. 20: Schéma technologie termického zpracování kalů

### 6.1.1. Proces spalování

Proces spalování je exotermním chemicko-fyzikálním procesem, který využívá slučování elementárních prvků hořlaviny (C, H a S v atomárním stavu) s okysličovadlem dle rovnic (19-21) (plyn obsahující kyslík, obvykle se jedná o vzduch), jehož výsledkem je produkce tepelné energie, tuhých reziduí (škváry) a plyných látek (spalin) skládajících se z produktů dokonalého spalování ( $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ ) a emisí (produkty nedokonalého spalování a škodlivé látky) [47].



Spalování probíhá ve spalovací komoře, jejíž součástí je ohniště a pomocná zařízení, která jsou nezbytná ke správné funkci spalovacího zařízení (zařízení dávkování paliva, přívodu okysličovadla, odvodu tuhých zbytků, trysek přidavného paliva, teplosměnných ploch, kouřovodu atd.). Pomocná zařízení závisí na typu ohniště (např. roštová, prášková, fluidní, atd.) a zvolený typ ohniště závisí na druhu paliva a možnostech jeho předúpravy. V případě spalování a spoluspalování kalů je obvykle nejpoužívanější fluidní spalování. Přehled různých typů ohnišť a jejich vhodnosti pro různá paliva je uveden v příloze 5 [48].

Jak je patrné z přílohy 5, ke spalování kalů je nejčastěji používáno fluidního spalování. Jeho výhody a nevýhody jsou uvedeny v [49].

Spalování kalů je také realizováno v rotačních pecích. Tento způsob je využíván převážně v případě, že se jedná o spoluspalování kalu v cementářských pecích. Spalování kalu na roštu je značně problematické, protože roštová ohniště jsou vhodná převážně pro kusová paliva. V případě spalování kalu na roštu by se tedy jednalo o kal s vysokým obsahem sušiny.

### 6.1.2. Škodliviny ze spalování

Jednotlivé druhy paliv mohou mít i výrazně odlišné charakteristiky, jako např. výhřevnost, vlhkost, chemické složení hořlaviny, které tak značně ovlivní celý spalovací proces, včetně vzniku znečišťujících látek. Kvalita spalování má velký význam z hlediska tvorby škodlivin [50]. Nedokonalé spalování způsobuje zpravidla přísun menšího množství kyslíku než je dle stechiometrických rovnic potřebné pro oxidační reakce. Nedokonalé spalování může také způsobit neadekvátní směšování paliva se spalovacím vzduchem, nízké spalovací teploty, nedostatečné setrvání na optimálních teplotách a další vlivy. Vzniku škodlivin ze spalování odpadů a jejich odstraňováním se zabývala již celá řada prací [50]-[56].

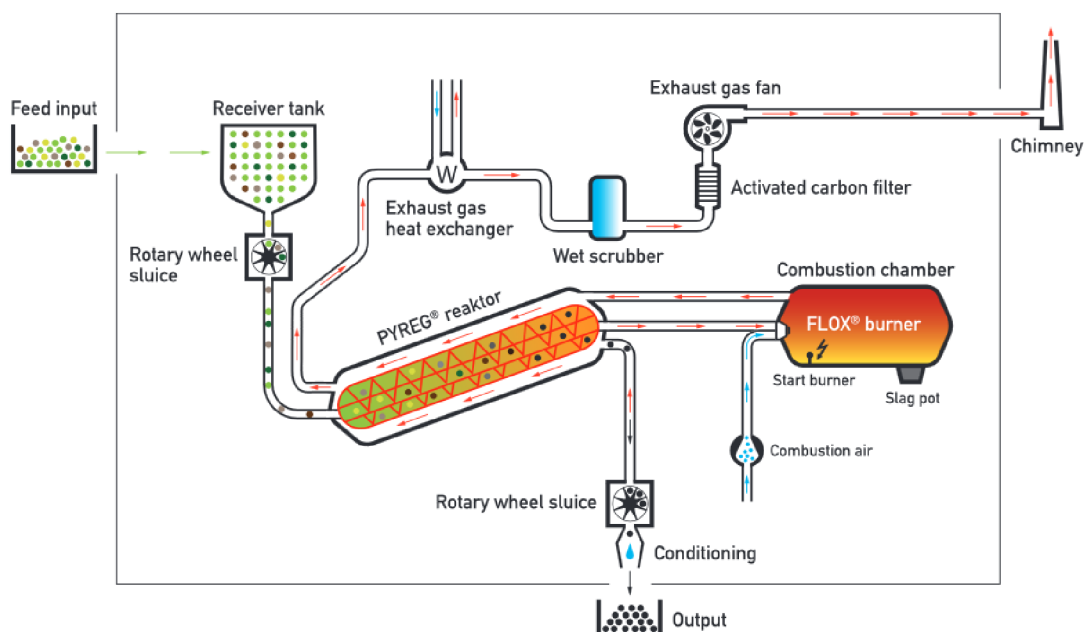
## 6.2. Pyrolýza

Pyrolýza je termický proces rozkladu organické části materiálu bez přístupu kyslíku. Procesu využití pyrolýzy pro zpracování čistírenského kalu se věnuje celá řada prací [57] a [58].

V ČR se v současné době jedná o možnost termického zpracování kalu pomocí pyrolýzních jednotek menších kapacit [59] (do vstupní energie v kalu 2,8 kWh/kg vstupního kalu při výhřevnosti 10 MJ/kg). Na trhu je několik výrobců kompaktních pyrolýzních jednotek (PYREG [60], nebo firma NGE s jednotkou T:CRACKER [61]). Tyto jednotky kombinují proces pyrolýzy s okamžitým spalováním produkovaného pyrolýzního plynu. Tímto řešením se předchází vzniku takzvaného pyrolýzního oleje, který je jedním z produktů pyrolýzních jednotek a vzniká kondenzací pyrolýzního plynu [62]. Tento pyrolýzní olej by jinak musel být dále zpracován a spalován ve vhodném zařízení. Posledním produktem pyrolýzy je pevný zbytek. Jedná se o nespalitelné složky kalu, zbytkový uhlík, těžké kovy a hlavně fosfor [63].

Okamžité spalování pyrolýzního plynu má další výhodu v produkci tepelné energie pro proces pyrolýzy. Tímto způsobem je dosaženo soběstačnosti z pohledu tepelné energie. Přídavného paliva (např. zemního plynu) se využívá pouze při startu procesu. Spotřeba zemního plynu pro start procesu je průměrně 28 m<sup>3</sup>/h zemního plynu při kapacitě zařízení 180 kg/h sušeného kalu [60]. Schéma pyrolýzní jednotky od firmy PYREG je znázorněno na obr. 21.

Produkované spaliny jsou využívány k produkci tepelné energie ve spalínovém výměníku, kde dochází k jejich dochlazení před několika stupňovým čištěním spalin, aby byly splněny emisní limity pro ochranu ovzduší ohledně znečišťujících látek.

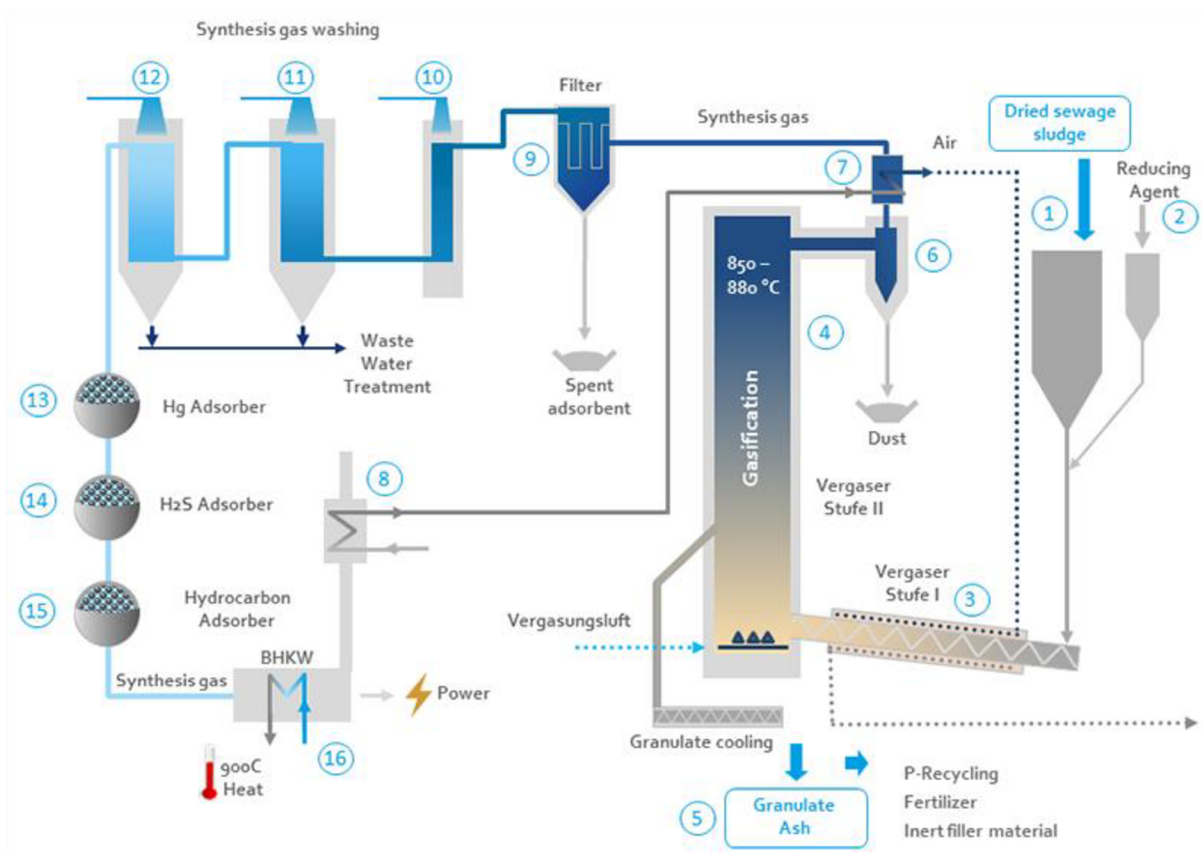


Obr. 21: Schéma pyrolýzní jednotky od firmy PYREG [60]



### 6.3. Zplyňování

Jedná se o podobnou technologii jako v případě pyrolýzy. Proces zplyňování čistírenských kalů je stále ve fázi výzkumu [64] a [65], případně ve zkušebním provozu prvních jednotek [66], a [67]. Použití procesu zplyňování je vhodnější pro větší kapacity, jako v případě přímého spalování kalu. V první fázi dochází k tepelnému rozkladu vstupního suchého kalu na plyn, uhlík a popel. Tyto produkty jsou vedeny do druhého stupně zplyňování, kde je uhlík podstechiometricky zplyňován a dochází k rozkladu složitějších molekul (tzv. dehtů) při teplotě okolo 850 °C. Produkovaný plyn je dále upravován pro spalování v účinných kogeneračních jednotkách kde se využívá pro produkci tepelné a elektrické energie. Technologické schéma zplyňovací jednotky od firmy Sülzle Kopf [68] je na obr. 22.



Obr. 22: Popis technologie termického zpracování kalů pomocí zplyňování [68]

## 7. Optimální stupeň vysušení kalu

Pro stanovení optimálního stupně vysušení kalu bylo nutné vytvořit výpočtové modely pro sušárnu a monospalovnu kalu s cílem zjistit, jaký vliv bude mít změna hodnoty požadované výstupní vlhkosti kalu ze sušárny na celkovou energetickou bilanci. V návaznosti na další výpočty uvedené v kap. 7 jsou v této kapitole popsány i výpočtové modely pro ostatní technologická zařízení, ze kterých se jednotlivé varianty kalové koncovky skládají (anaerobní stabilizace, kogenerační jednotka).

### 7.1. Výpočtový model anaerobní stabilizace kalu

Teoretický popis procesu anaerobní stabilizace je uveden v kap 4.4. Pro účely výpočtu navazujících technologií bylo třeba určit chemické složení anaerobně stabilizovaného kalu, měrnou produkci sušiny ASK a měrnou produkci bioplynu. Z chemických rozborů a měření na ÚČOV Praha [10] lze provádět ověření pomocí materiálové a energetické bilance.

Jako vstupní údaje pro výpočet jsou využity chemické rozborů uvedené Houdkovou [10] viz. tab. 14 a tab. 15.

Tab. 14: Chemické složení kalu z laboratorních zkoušek [10]

Veličina	Jednotka	SSK		ASK	
		Hořlavina	Suchý vzorek (hořl.+popel.)	Hořlavina	Suchý vzorek (hořl.+popel.)
Obsah C	% hm.	60,27	40,72	62,7	30,85
Obsah H	% hm.	6,51	4,4	8,27	4,07
Obsah N	% hm.	8,35	5,64	7,38	3,63
Obsah O	% hm.	24,79	16,75	21,6	10,63
Obsah S	% hm.	0,05	0,03	0,05	0,02
Obsah Cl	% hm.	0,0143	0,01	0	0
Obsah F	% hm.	0,0124	0,01	0	0
Obsah P	% hm.	0	0	0	0
Obsah popelovin v suchém vz.	% hm.	-	32,43	-	50,8
Celkem	% hm.	100	100	100	100

Tab. 15: Chemické složení produkovaného bioplynu z anaerobní stabilizace [10]

Veličina	jednotka	Hodnota
Obsah CH <sub>4</sub>	% obj.	61
Obsah CO <sub>2</sub> a N <sub>2</sub>	% obj.	38
Obsah H <sub>2</sub>	% obj.	1

Pro výpočet materiálové bilance je přijato několik předpokladů:

- veškerý podíl popelovin v SSK přechází do ASK,
- zbývající část kromě anorganického podílu je považováno za organický podíl (VL),
- měrná produkce bioplynu z organického podílu je 0,63 m<sup>3</sup>/kg VL,
- jako výchozí složení kalu je bráno chemické složení pro SSK,
- v rámci bilance je uvažováno s chemickým složením hořlaviny ASK.

Materiálovou bilanci lze zapsat rovnicí (22).

$$\dot{m}_{SSK,SUŠ} [\text{kg/h}] = \dot{m}_{ASK,SUŠ} + \dot{m}_{BIOPL} \quad (22)$$

Po úpravě vztahu (22) dle předchozích předpokladů je lze vyjádřit rovnicí (23).

$$\dot{m}_{SSK, VL} [\text{kg/h}] = \dot{m}_{ASK, VL} + \frac{0,63 \cdot \dot{m}_{SSK, VL}}{22,414} \cdot MW_{BIOPL} \quad (23)$$

Odchylka v materiálové bilanci pro vstup/výstup vychází po dosazení hodnot z tab. 14 cca 8,3 % (viz tab. 16). Ověření dle energetické bilance je možné pouze po určení kalorického obsahu všech vstupů a výstupů.

Pro výpočet spalného tepla a výhřevnosti při spalování kalů lze s výhodou užít vztah dle Channiwala z roku 1992 [18], jehož výsledky vychází srovnatelně s hodnotami naměřenými při zkouškách v laboratoři (viz kap. 2.1, tab. 1). Pro zjednodušení výpočtu je zanedbáno teplo dodané z externího zdroje do procesu anaerobní stabilizace pro dosažení optimální teploty uvnitř nádrže a tepelné ztráty. Energetickou bilanci vstup/výstup pro směsný surový kal, vyprodukovaný bioplyn a anaerobně stabilizovaný kal, lze zapsat dle rovnic (24) a (25).

$$\dot{Q}_{SSK} [\text{MJ/h}] = \dot{Q}_{ASK} + \dot{Q}_{BIOPL} \quad (24)$$

$$\dot{m}_{SSK,SUŠ} \cdot LHV_{SSK,SUŠ} = \dot{m}_{ASK,SUŠ} \cdot LHV_{ASK,SUŠ} + \dot{V}_{BIOPL} \cdot LHV_{BIOPL} \quad (25)$$

Soupis hodnot pro obě bilance je sumarizován v tab. 16.

Tab. 16: Vstupní a výsledné hodnoty hmotnostní a energetické bilance

Veličina	Označení	Jednotka	SSK	ASK	Bioplyn	Rozdíl bilance[%]
Hmotnostní tok	m	[kg/h]	1000	638	-	8,4
Objemový tok	V	[m <sup>3</sup> /h]	-	-	425,69	-
Výhřevnost složky	LHV	[MJ/kg]	15,812	12,354	21,93	-
Kalorický obsah složky	Q	[MJ/h]	15812	7882	9337	8,9

Aby bylo možné s těmito hodnotami následně pracovat a nepřenášela se chyba v kalorickém obsahu kalu, je pro potřeby výpočtového modelu upraveno množství anaerobně stabilizovaného kalu pomocí úpravy stupně konverze organických látek, čímž je způsobena

změna v množství popelovin. Výsledná bilance anaerobní stabilizace je uvedena v tab. 17. Pro potřeby výpočtového modelu je 3% rozdíl v materiálové bilanci vstup/výstup přijatelný.

Tab. 17: Upravené hodnoty hmotnostní a energetické bilance

Veličina	Označení	Jednotka	SSK	ASK	Bioplyn	Rozdíl bilance[%]
Hmotnostní tok	m	[kg/h]	1000	587	-	3,3
Objemový tok	V	[m <sup>3</sup> /h]	-	-	425,69	-
Výhřevnost složky	LHV	[MJ/kg]	15,812	11,037	21,93	-
Kalorický obsah složky	Q	[MJ/h]	15812	6475	9337	0

Přijaté složení sušiny anaerobně stabilizovaného kalu udává tab. 18.

Tab. 18: Upravené chemické složení anaerobně stabilizovaného kalu

Veličina	Jednotka	ASK	
		hořlavina	suchý vz. (hořl.+popel.)
Obsah C	% hm.	62,7	28,04
Obsah H	% hm.	8,27	3,70
Obsah N	% hm.	7,38	3,30
Obsah O	% hm.	21,6	9,66
Obsah S	% hm.	0,05	0,02
Obsah Cl	% hm.	0	0
Obsah F	% hm.	0	0
Obsah P	% hm.	0	0
obsah popelovin v suchém vz.	% hm.	0	55,28

## 7.2. Výpočtový model kogenerační jednotky

Výpočtový model kogenerační jednotky vychází z údajů garantovaných výrobcem – firmou Motorgas pro zvolený typ jednotky MGW700. Z dostupných technologických listů výrobce [69] se udává účinnost výroby elektrické energie 34,1 % a pro výrobu tepelné energie účinnost 49,7 % (Technický list pro 75% zatížení zařízení Příloha 5 [69]). Tepelný výkon je z kogenerační jednotky dodáván ve formě teplé vody s teplotním spádem 90/70 °C. U varianty s termickou hydrolýzou porovnávanou v kap. 9.3.2 je produkována tepelná energie rozdělena do dvou teplotních úrovní. Horké spaliny jsou využity pro výrobu páry vhodnou pro použití v technologii termické hydrolýzy (sytá pára o tlaku 11 barg). Využití tepelné energie z chlazení motoru je stejné jako v ostatních případech a je využito pro ohřev teplé vody o teplotním spádu 90/70 °C. V tomto případě je poměr produkce tepelného výkonu pára/voda 50 %.

## 7.3. Výpočtový model sušárny kalu

Sušárna kalu je energeticky nejnáročnější zařízení v technologii kalové koncovky. Z tohoto důvodu je důležité vytvořit bilanční model, který bude respektovat změny vstupních

parametrů, a které mohou v reálném provozu nastat (mezi nejdůležitější patří změny teploty a vlhkosti vzduchu v průběhu dne a roku).

### 7.3.1. Strategie výpočtu nízkoteplotní pásové sušárny

Postup výpočtu nízkoteplotní sušárny kalu je založen na provozních zkušenostech německého výrobce sušáren [70]. Výpočtový model byl vytvořen v rozhraní programu MS Excel s využitím pokročilejších nástrojů, které jsou součástí tohoto programu. Jedná se o programovatelné rozhraní Visual Basic for Application (VBA). Využití VBA je výhodné z pohledu dalšího rozvoje softwaru W2E o návrhový blok nízkoteplotní sušárny. Výpočtový model v prostředí MS Excel a VBA je flexibilní a po jeho úpravě je možné ho použít pro W2E v programovacím jazyku Java. Model je schopný reagovat na změnu zadávacích parametrů uvedených v tab. 19. Modře zvýrazněné hodnoty jsou nastaveny dle provozních zkušeností. Ostatní hodnoty vychází z lokálních podmínek, pro které je zařízení nízkoteplotní sušárny navrhováno.

Tab. 19: Přehled zadávacích parametrů do výpočtového modelu sušárny kalu

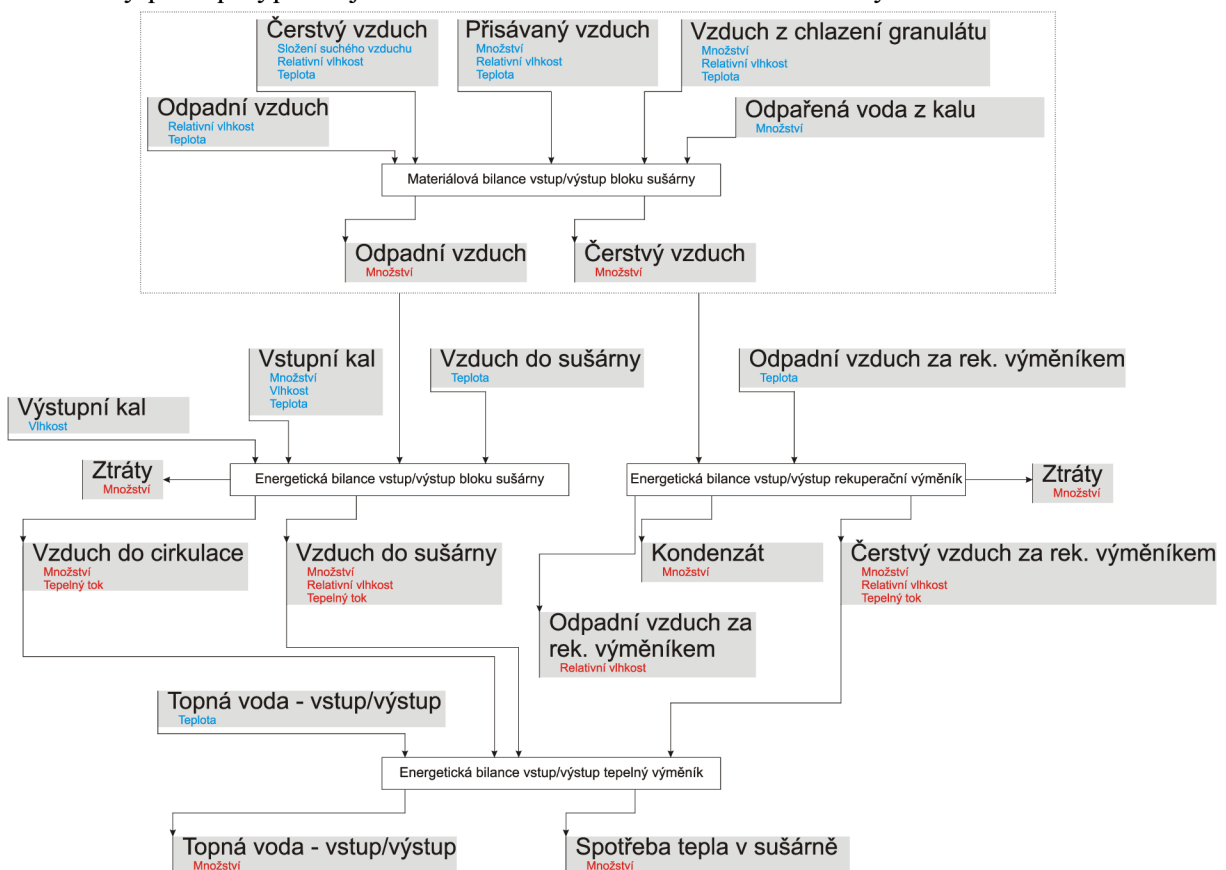
Proud	Veličina	Hodnota	Jednotka	
Vstupní kal	Množství	2775	kg/h	
	Sušina	30	%	
	Teplota	5	°C	
Výstupní kal	Sušina	90	%	
Vzduch na vstupu do sušící komory	Teplota	80	°C	
Nasávaný čerstvý vzduch	Teplota	15	°C	
	Tlak	100	kPa	
	Relativní vlhkost	75	%	
	Objemové složení suchého vzduchu	N2	78,08	%
		Ar	0,93	%
CO2		0,04	%	
O2		20,95	%	
Přisávání vzduchu	Teplota	15	°C	
	Relativní vlhkost	75	%	
Výstupní odpadní vzduch ze sušárny	Relativní vlhkost	33,5	%	
	Teplota	67	°C	
	Teplota za rekuperačním výměníkem	45	°C	
Voda pro ohřev vzduchu	Vstupní teplota	90	°C	
	Výstupní teplota	70	°C	
	Ztráty sušárny	3	%	
Voda pro chlazení odplynů	Vstupní teplota	12	°C	
	Výstupní teplota	45	°C	

Pro výpočet a potřeby modelu sušárny je přijato několik předpokladů, které vychází z provozních zkušeností:

- chemické složení suchého vzduchu je shodné pro všechny vstupní proudy,
- měrná tepelná kapacita sušiny kalu je 1,45 kJ/(kgK) avody 4,18 kJ/(kgK) pro výpočet tepelné energie vstupního a výstupního proudu kalu,
- tlaková ztráta cirkulačního okruhu v rámci procesu sušení pro ventilátory, které způsobují proudění vzduchu uvnitř sušárny, je 670 Pa,
- tlaková ztráta je konstantní a změna tlakové ztráty v závislosti na změně rychlosti proudění vzduchu není uvažována,
- velikost sušárny je navrhována na 16 kg/h odpařené vody na 1m<sup>2</sup> účinné výparné plochy sušícího pásu.

Z parametrů v tab. 19 jsou významné parametry teploty a relativní vlhkosti vystupujícího odpadního vzduchu ze sušárny. Úprava těchto parametrů výrazně ovlivňuje energetickou spotřebu a konstrukční řešení sušárny (Dále kap. 7.3.2).

Celý postup výpočtu je rozdělen do několika kroků znázorněných na obr. 23.



Obr. 23: Schéma postupu výpočtu sušárny kalu

Prvním krokem výpočtu je stanovení množství čerstvého vzduchu přísávaného do sušárny. Vstupní množství čerstvého vzduchu, je nutné do sušárny přivádět tak, aby bylo dosaženo zvolené relativní vlhkosti výstupní vzdušiny. Vstupní množství čerstvého vzduchu a výstupní množství odpadní vzdušiny jsou vypočítána na základě materiálové bilance vstup/výstup suchého vzduchu a vody. Obsah vodní páry ve vzdušně je určen pomocí zjištěného tlaku nasycených par dle Antoineovy rovnice (26) s uvažováním zvolené stupně

nasycení plynu vodní parou. Koeficienty Antoineovy rovnice pro vodu jsou uvedeny v tab. 20.

$$\log p^0 = A - \frac{B}{t + C} \quad (26)$$

Kde: p [kPa] a t [°C]

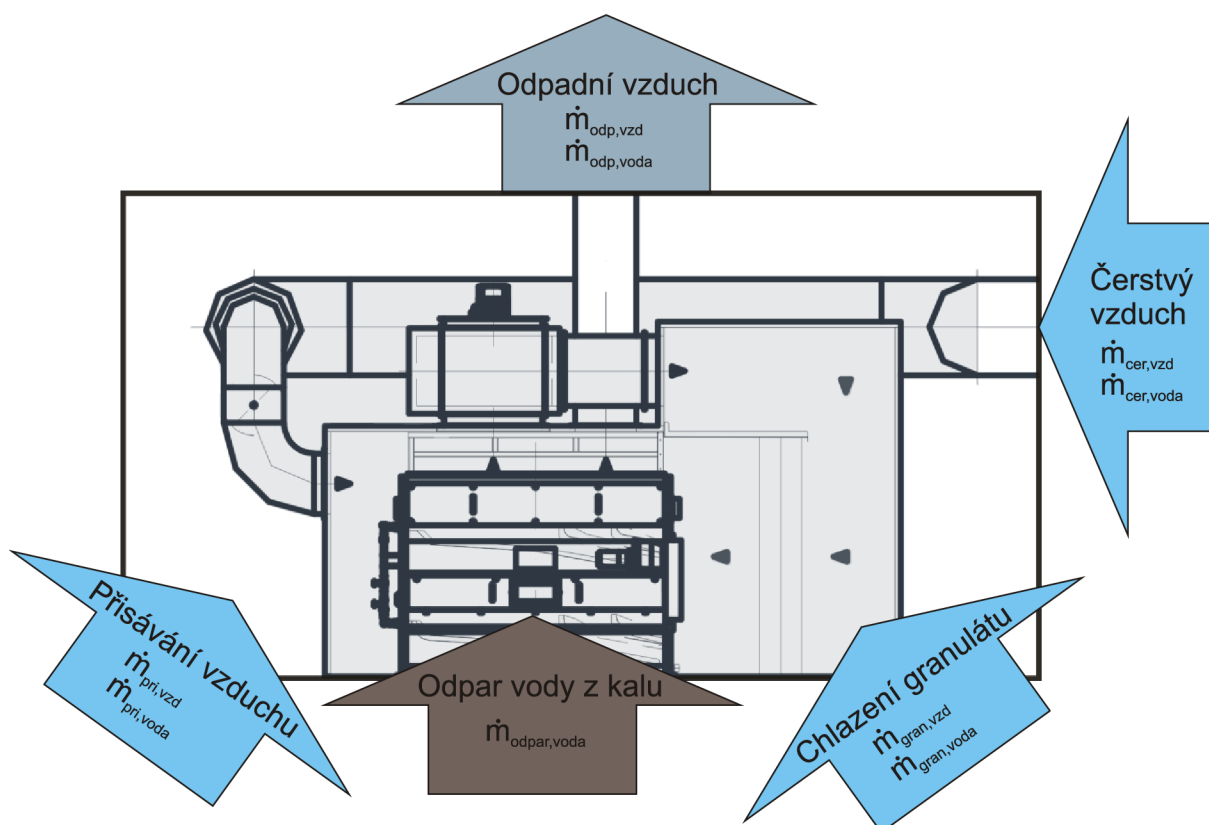
Tab. 20: Látkové konstanty Antoineovy rovnice pro H<sub>2</sub>O

Teplotní interval	1-100°C	100-265°C
A	7,19621	7,14258
B	1730,63	1715,7
C	233,426	234,268

Bilance je znázorněna na obr. 24 a je dána rovnicí (27) pro suchý vzduch a vztahem (28) pro vodu.

$$\dot{m}_{\text{ODP,VZD}} = \dot{m}_{\text{CER,VZD}} \cdot \dot{m}_{\text{GRAN,VZD}} + \dot{m}_{\text{PRI,VZD}} \quad (27)$$

$$\dot{m}_{\text{ODP,VODA}} = \dot{m}_{\text{CER,VODA}} \cdot \dot{m}_{\text{GRAN,VODA}} + \dot{m}_{\text{PRI,VODA}} + \dot{m}_{\text{ODPAR,VODA}} \quad (28)$$



Obr. 24: Bilanční schéma vstupy/výstupy první fáze výpočtu

Sušárna je navrhována na výstupní teplotu vzdušiny 68 °C a relativní vlhkost výstupního vzduchu 33,5 %. Celé zařízení sušárny je provozováno v mírném podtlaku z důvodu zamezení šíření zápachu do prostoru haly. V rámci výpočtu je uvažováno

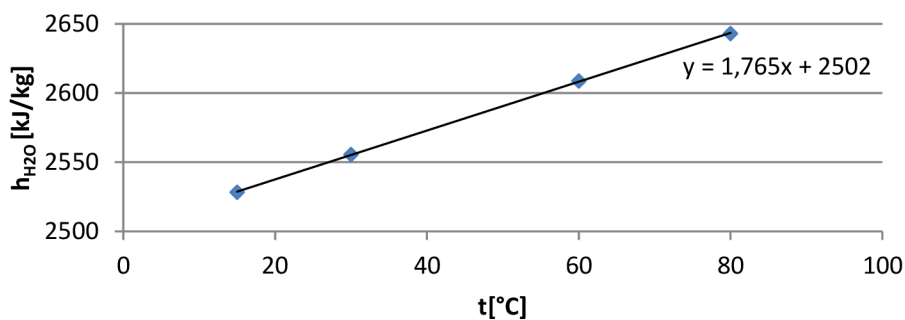
s absolutním tlakem 98 kPa. Množství přisávaného vzduchu při teplotě 15 °C a relativní vlhkosti 75 % bylo zvoleno ve výši 2 358 kg/h. Množství přisávaného vzduchu bylo nastaveno na fixní hodnotu po konzultaci s výrobcem sušáren. V první fázi výpočtu bylo přisávání závislé na velikosti sušárny, což bylo následně změněno, neboť zařízení sušárny je velmi dobře utěsněno i mezi jednotlivými segmenty a k přisávání dochází převážně jen v přední části sušárny v okolí distributoru kalu.

Druhým krokem je bilanční výpočet hlavního uzlu, tj. prostředí uvnitř sušárny v místě, kde dochází k odpaření vody z kalu. Důležitým bodem je vypočtení množství vzduchu vstupujícího do sušicí komory a zároveň množství vzduchu, které je odváděno zpět na výměníky a znovu použito (cirkulující vzduch). Předpokladem výpočtu je, že cirkulující vzduch uvnitř sušárny (na výstupu ze sušicí komory) je o stejných parametrech a stejném složení jako výstupní odpadní vzduch ze sušárny. Rozdílné je pouze jeho množství oproti odpadnímu vzduchu. Dalším předpokladem je teplota vzduchu 80 °C na vstupu do sušicí komory (vstupní údaje v tab. 24). Tepelné ztráty bloku sušárny jsou dle provozních zkušeností stanoveny na 0,2 % z entalpického toku vstupní vzdušiny do sušicí komory. Na základě předchozích předpokladů je vytvořena materiálová a energetická bilance vstupů/výstupů a je určeno množství vzduchu na vstupu do sušicí komory a současně množství vzduchu pro cirkulaci. Tuto bilanci lze zapsat rovnicí (29).

$$\dot{Q}_{VST,KALU} + \dot{Q}_{PRI,VZD} + \dot{Q}_{GRA,VZD} + \dot{Q}_{VST,SUŠ,VZD} = \dot{Q}_{VÝST,KALU} + \dot{Q}_{ODP,VZD} + \dot{Q}_{CIRK,VZD} + \dot{Q}_{ZTR} \quad (29)$$

Energetický obsah každého proudu je rozdělen na 2 složky, a to energetický tok v suchém vzduchu/kalu a energetický tok ve vodě/vodní páře. Pro určení tepelného toku vstupních proudů ve vodní páře byla určena lineární rovnice (30) pro měrnou entalpii dle dat získaných z parních tabulek [71]. Lineární závislost je znázorněna v grafu na obr. 25.

$$h_{H_2O} [\text{kJ/kg}] = 1,765 \cdot t + 2502 \quad (30)$$



Obr. 25: Lineární závislost měrné entalpie pro vodní páru na teplotě (ref. Stav 0 °C, 1 atm a H<sub>2</sub>O(l))

Pro určení měrné entalpie proudů v suchém vzduchu jsou použity konstanty uvedené v tab. 21 a rovnice (31-35).



Tab. 21: Konstanty pro výpočet měrné entalpie suchého vzduchu [72]

Složka suchého vzduchu	a	b	c	d	e
Jednotka	[kJ/(kmolK)]	[kJ/(kmolK <sup>2</sup> )]	[kJ/(kmolK <sup>3</sup> )]	[kJ/(kmolK <sup>4</sup> )]	[kJ/(kmolK <sup>-1</sup> )]
O <sub>2</sub>	24,33747	0,016614	-7,4E-06	1,25E-09	67779
CO <sub>2</sub>	31,95636	0,035708	-1,5E-05	2,31E-09	-375874
N <sub>2</sub>	23,63908	0,012546	-4,1E-06	4,8E-10	172470
Ar	20,80839	0	0	0	0

$$h_j \left[ \text{kJ} / \text{m}_N^3 \right] = \left( a_j \cdot k_0 + b_j \cdot k_1 + c_j \cdot k_2 + d_j \cdot k_3 - \left( \frac{e_j}{T} - \frac{+e_j}{273,15} \right) \right) \cdot \frac{1}{V_n} \quad (31)$$

$$k_0 = T - 273,15 \quad (32)$$

$$k_1 = \frac{T^2 - 273,15^2}{2} \quad (33)$$

$$k_2 = \frac{T^3 - 273,15^3}{3} \quad (34)$$

$$k_3 = \frac{T^4 - 273,15^4}{4} \quad (35)$$

Dalším krokem je bilanční výpočet deskového výměníku pro předeřev čerstvého vzduchu vzduchem odpadním ze sušárny (36). Cílem výpočtu této bilance vstupů a výstupů je určení teploty čerstvého předeřátého vzduchu vstupujícího do sušárny a množství vody v odpadním plynu, neboť ve většině případů dochází ve výměníku k částečné kondenzaci. Množství zkondenzované vodní páry ze vzduchu je dopočítáno jako rozdíl mezi množstvím vodní páry při 100% vlhkosti vzduchu na výstupu z výměníku a množstvím vodní páry, která do výměníku vstupuje v odpadním plynu. Kondenzační teplo vzniklé při kondenzaci přebytečných vodních par je předáno předeřívanému čerstvému vzduchu.

$$\dot{Q}_{\text{ODP,VZD,REK,IN}} + \dot{Q}_{\text{CER,VZD,REK,IN}} + \dot{Q}_{\text{KOND}} = \dot{Q}_{\text{ODP,VZD,REK,OUT}} + \dot{Q}_{\text{KOND,VODA,OUT}} + \dot{Q}_{\text{CER,VZD,REK,IN}} + \dot{Q}_{\text{ZTR}} \quad (36)$$

Předeřátý čerstvý vzduch je mísen s cirkulujícím vzduchem za sušící komorou a je veden pomocí ventilátorů do výměníků tepla, kde je dohříván pomocí teplé vody na zvolenou teplotu před vstupem do sušící komory (80 °C dle tabulky vstupních údajů tab. 25).

V této fázi výpočtu lze navázat na předchozí bilance a určit tepelný výkon, který bude nutné dodat ve formě teplé vody s teplotním spádem 90/70 °C do tepelných výměníků pro dohřátí vzduchu před vstupem do sušící komory. Z provozních zkušeností jsou nastaveny tepelné ztráty v sušárně na 3 % z tepelného příkonu dodaného v horké vodě. Bilanci pro tepelný výměník lze zapsat rovnicí (37).

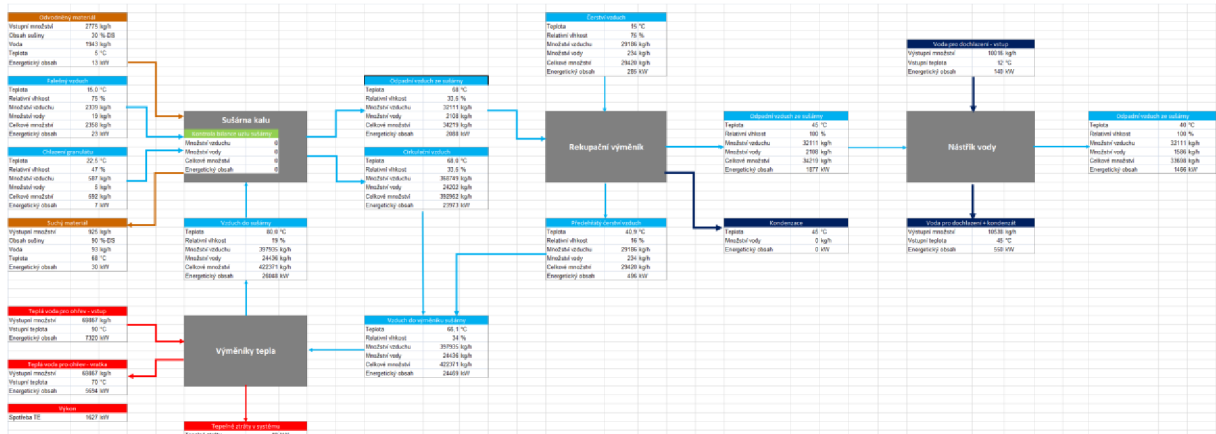
$$\dot{Q}_{HV, Vstup} + \dot{Q}_{CER, ZAREK, VZD} + \dot{Q}_{CIRK, VZD} = \dot{Q}_{VST, SUŠ, VZD} + \dot{Q}_{HV, Výstup} \quad (37)$$

Posledním bodem bilance je určení množství vody na dochlazení odpadního plynu před chemickou úpravou na 40°C. Toho je docíleno nástřikem studené vody přímo do proudu vzduchu. Při vyšším teplotním spádu sušárny (např. teplota vzduchu na vstupu do sušící komory 123 °C a ohřev teplou vodou o teplotním spádu 140/120 °C) se místo nástřiku vody do odpadního plynu využívá trubkového výměníku pro produkci teplé vody o teplotě okolo 55 °C, kterou lze dále využívat např. pro ohřev vyhřívacích nádrží.

### 7.3.2. Citlivost výpočtového modelu na změnu vstupních parametrů

V kap. 5.2.1 bylo zmíněno, že některé vstupní parametry jsou zvoleny dle provozních zkušeností výrobce (teplota a relativní vlhkost odpadního plynu na výstupu ze sušárny, teplota a relativní vlhkost nasávaného čerstvého vzduchu). Změny těchto vstupních parametrů mají významný vliv na energetickou spotřebu zařízení a v některých případech i na velikost sušárny.

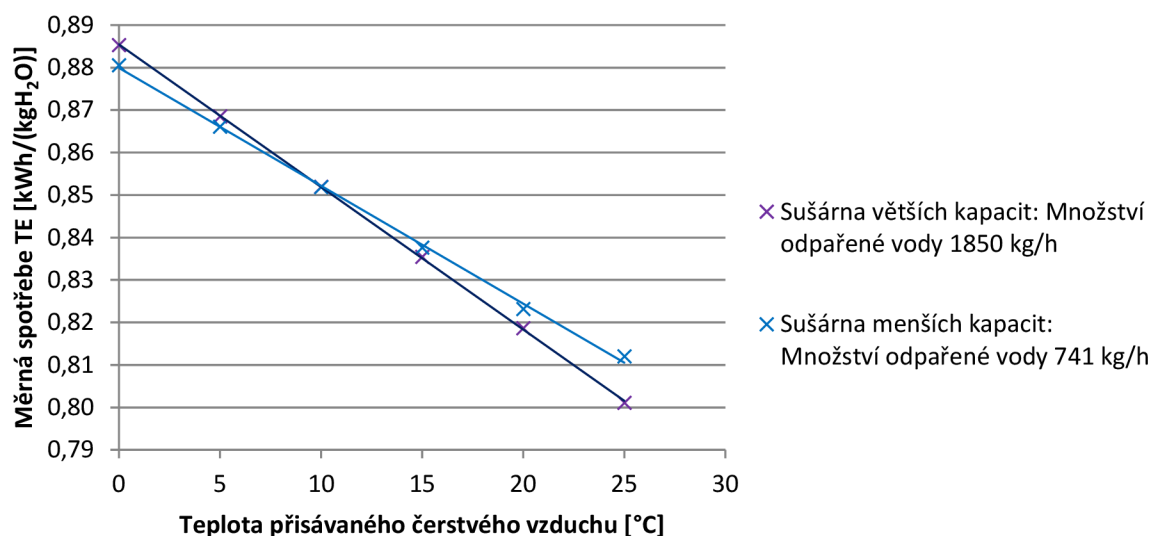
Pro názornost a lepší přehlednost výsledků modelu bylo vytvořeno jednoduché technologické schéma. Na obr. 26 je náhled na výstupní technologické schéma sušárny z výpočtového programu MS Excel s využitím VBA a se zahrnutím materiálových a energetických toků v rámci technologie nízkoteplotního sušení.



Obr. 26: Náhled na výstupní schéma výpočtu sušárny

Výsledná bilanční schémata pro jednotlivé varianty jsou uvedena dále v jednotlivých kapitolách a jsou součástí přílohy 8 disertační práce. Většina nízkoteplotních sušáren je navrhována pro teplotu čerstvého vzduchu a přísávaného vzduchu 15 °C. Jak již bylo zmíněno v technickém popisu sušárny (kap. 5.2.1), zvláště v zimním období je využíváno alespoň částečného sání čerstvého vzduchu z vnějšího okolí budovy sušárny, aby nedocházelo k nadměrnému ochlazení budovy. Pro správné dimenzování zdroje tepelné energie pro sušárnu je důležitá závislost měrné tepelné spotřeby a teploty čerstvého vzduchu. Tato závislost je znázorněna na grafu obr. 27. Jak je z grafu patrné, sušárna o nižší kapacitě je na změnu vstupní teploty čerstvého vzduchu méně citlivá, než je tomu v případě větších kapacit. V případě větší kapacity se měrná spotřeba tepelné energie na kilogram odpařené vody

pohybuje v rozmezí 0,885 kWh/(kg H<sub>2</sub>O) při teplotě vzduchu 0 °C (zimní období) až po 0,800 kWh/(kg H<sub>2</sub>O) při teplotě vzduchu 25 °C v letním období.



Obr. 27: Graf závislosti měrné spotřeby tepelné energie na teplotě nasávaného čerstvého vzduchu

Pro menší kapacity (cca 740 kg/h odpařené vody) je možné vyjádřit závislost spotřeby tepelné energie na teplotě čerstvého vzduchu rovnicí (38) a pro větší kapacity (cca 1 850 kg/h odpařené vody) rovnicí (39). Nižší citlivost spotřeby tepelné energie na změnu teploty čerstvého vzduchu u sušárny je způsobena nižším poměrem čerstvého vzduchu ke vzduchu cirkulujícímu v sušárně. V případě menších kapacit je množství čerstvého vzduchu přibližně na úrovni 5,5 % ohřátého vzduchu na vstupu do sušicí komory. V případě větších kapacit je množství čerstvého vzduchu 6,8 % cirkulujícího. Rozdíl je způsoben již dříve zmíněným fixním nastavením množství přisávaného vzduchu bez ohledu na velikost sušárny (kap. 7.3.1.).

$$e_{small} [\text{kWh}/(\text{kgodp.H}_2\text{O})] = -0,002 \cdot t + 0,879 \quad (38)$$

$$e_{big} [\text{kWh}/(\text{kgodp.H}_2\text{O})] = -0,003 \cdot t + 0,885 \quad (39)$$

Dle výpočtu a závislosti měrné spotřeby tepelné energie na vstupní teplotě čerstvého vzduchu (obr. 27) se spotřeba tepelné energie může v zimním období zvýšit o 5–7 % tepelné energie dodané do výměníku sušárny.

Při změně parametrů výstupního odpadního proudu je citlivost modelu značná, a to protože změna parametrů odpadního vzduchu má vliv na množství vzduchu, které je na vstupu do sušicí komory.

Pro dimenzování sušárny je nezbytné do těchto výpočtů zahrnout spotřebu elektrické energie pro pohon cirkulačních ventilátorů a také objemový průtok vzduchu na 1 segment sušárny. Dle zvolených předpokladů v předchozí kapitole kap. 7.3.1 (konstantní tlaková ztráta v zařízení sušárny z pohledu proudění vzduchu 670 Pa) je stanoven příkon ventilátorů pro

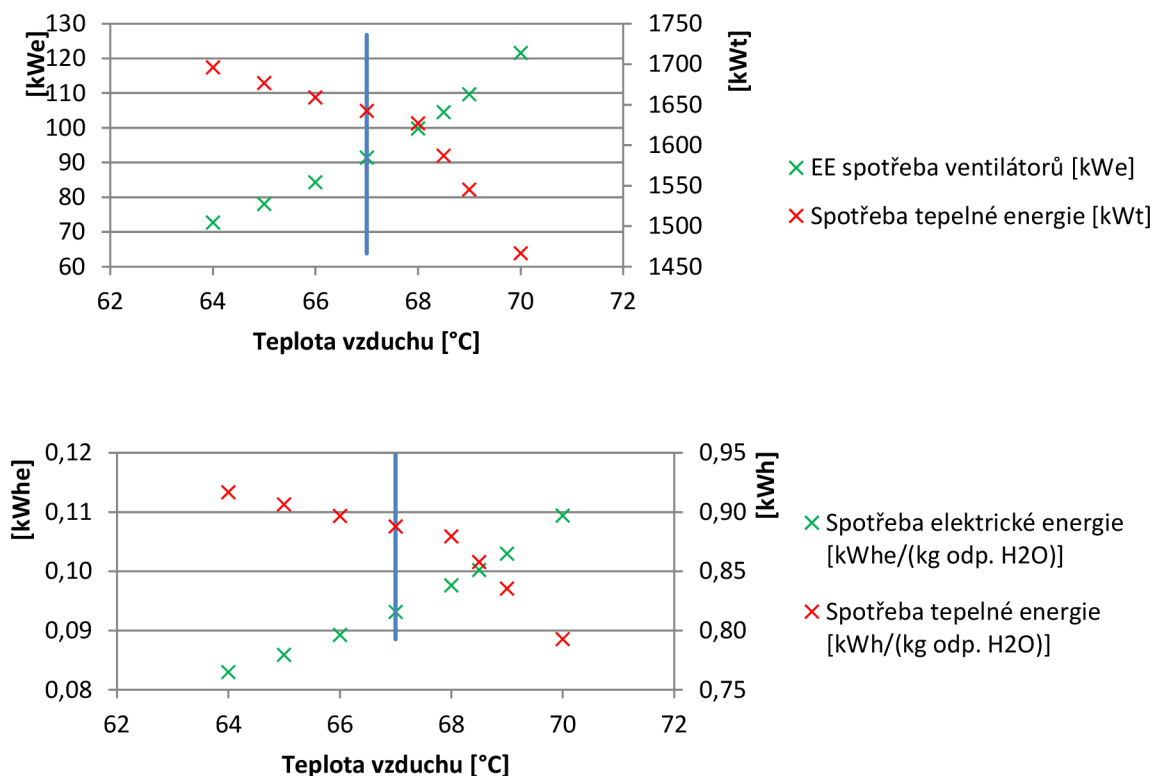
účinnost ventilátoru 80 %. Příkon ventilátoru je vypočten dle vztahu (40) a je závislý na množství vzduchu proudícího ventilátorem a tlakové diferenci.

$$P = \frac{\Delta p \cdot V}{\eta} \quad (40)$$

V prvním případě byla v rámci výpočtů zvolena změna výstupní teploty v rozmezí 64-70 °C při konstantní vlhkosti vzduchu 33,5 %. Výsledky výpočtu jsou uvedeny v tab. 22 a znázorněny na grafu v obr. 28.

Tab. 22: Výsledky bilančního modelu sušárny pro proměnou teplotu odpadního plynu

Teplota [°C]	Spotřeba TE [kWh/h]	Spotřeba TE [kWh/kg odp. H <sub>2</sub> O]	Spotřeba EE [kWh/h]	Spotřeba EE [kWh/kg odp. H <sub>2</sub> O]	Počet segmentů suš.
64	1696	0,917	153,52	0,083	8
65	1677	0,906	158,92	0,086	8
66	1659	0,897	165,11	0,089	9
67	1642	0,888	172,25	0,093	10
68	1627	0,879	180,60	0,098	10
68,5	1587	0,858	185,34	0,100	11
69	1545	0,835	190,48	0,103	11
70	1466	0,793	202,35	0,109	12

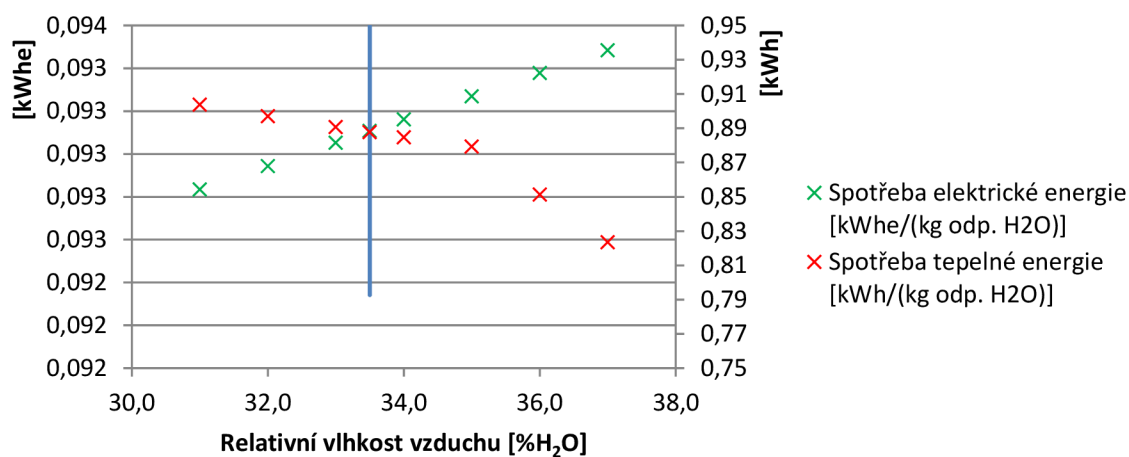
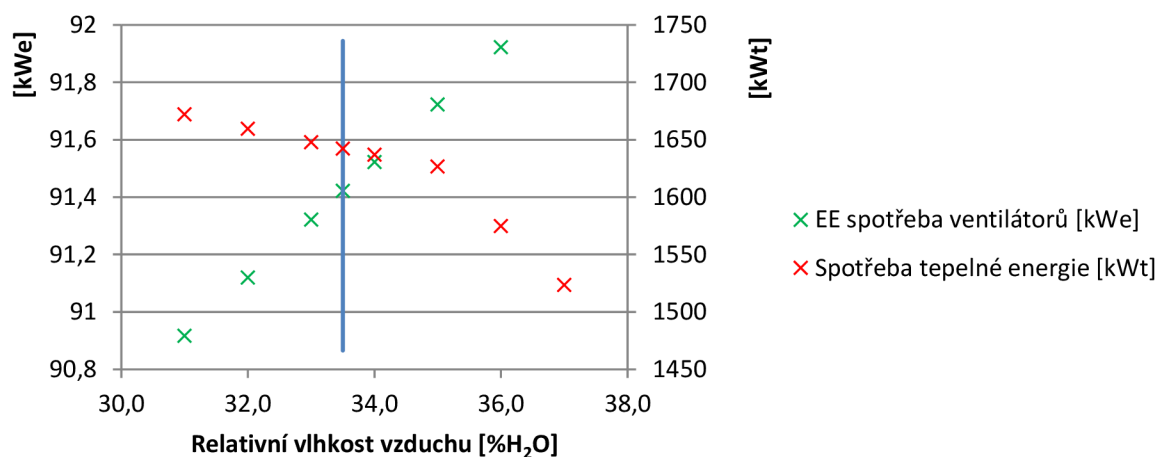


Obr. 28: Graf vlivu změny nastavení teploty odpadního vzduchu odváděného ze sušárny na spotřebu energií

V druhém případě byla měněna relativní vlhkost odpadního vzduchu v rozmezí 30-38 % H<sub>2</sub>O při konstantní teplotě 67 °C. Výsledky výpočtu jsou uvedeny v tab. 23 a znázorněny na grafu v obr. 29.

Tab. 23: Výsledky bilančního modelu sušárny a termického zpracování pro proměnou relativní vlhkost odpadního plynu

Relativní vlhkost [%H <sub>2</sub> O]	Spotřeba TE [kWh/h]	Spotřeba TE [kWh/kg odp. H <sub>2</sub> O]	Spotřeba EE [kWh/h]	Spotřeba EE [kWh/kg odp. H <sub>2</sub> O]	Počet segmentů suš.
31	1672	0,904	171,75	0,09	9
32	1660	0,897	171,95	0,09	9
33	1648	0,891	172,15	0,09	9
33,5	1642	0,888	172,25	0,09	10
34	1637	0,885	172,35	0,09	10
35	1627	0,879	172,55	0,09	10
36	1575	0,851	172,75	0,09	10
37	1524	0,824	172,95	0,09	10



Obr. 29: Graf vlivu změny nastavení relativní vlhkosti odpadního vzduchu odváděného ze sušárny na spotřebu energii

Z výsledků výpočtů vyplývá, že změna relativní vlhkosti odpadního vzduchu v rozmezí 31–37 %H<sub>2</sub>O nemá na spotřebu elektrické energie výraznější vliv (rozdíl do 1 % oproti původní návrhové hodnotě relativní vlhkosti 33,5 % H<sub>2</sub>O). V případě tepelné energie je rozdíl výraznější, a to téměř o 5% oproti původní hodnotě tepelné energie vstupující do tepelného výměníku uvnitř sušárny při návrhové hodnotě relativní vlhkosti 33,5 %H<sub>2</sub>O. Mnohem výraznější vliv na energetické nároky nízkoteplotní sušárny kalu má změna teploty odpadního vzduchu v intervalu 64–70 °C, oproti změně relativní vlhkosti odpadního vzduchu. Rozdíly spotřeby tepelné energie jsou v rozmezí 5–10 % oproti tepelnému příkonu při teplotě odpadního vzduchu 67 °C. Velice výrazný je nárůst spotřeby elektrické energie pro pohon ventilátorů při zvýšení teploty na 70 °C. Oproti spotřebě při 67 °C nastává zvýšení příkonu o více než 30 %. Tyto rozdíly jsou způsobeny především výrazným navýšením množství vzduchu, které musí cirkulovat uvnitř zařízení sušárny, poněvadž na stejné množství odpařené vody je k dispozici nižší teplotní spád a vzduchu musí být tedy více. Výrazné zvýšení průtoku vzduchu uvnitř sušárny má také za následek větší dimenzi sušárny a zvýšení investičních nákladů.

Souběžně se zvýšením teploty odpadního vzduchu dochází ke snížení množství odpadního vzduchu ze sušárny, protože i přes konstantní hodnotu relativní vlhkosti se mění hodnota parciálního tlaku vodních par. Změna tlaku vodní páry ve vzduchu má za následek změnu poměru suchého vzduchu a vody (na odvedení stejného množství vody ze sušárny je dostačující menší množství suchého vzduchu o vyšší teplotě). Z toho vyplývá, že zvýšením teploty dochází ke snížení množství nasávaného čerstvého vzduchu a tím i ke snížení potřebného množství tepla pro dohřátí vzduchu před sušicí komorou.

## 7.4. Výpočtový model monospalovny kalu:

Technologie monospalování vysušeného kalu přímo navazuje na sušárnu kalu. Hodnoty vstupního množství a vlhkosti kalu jsou dány výstupem ze sušárny. Vstupní vlhkost kalu má výrazný vliv na výhřevnost kalu a tím i na hlavní energetický proud vstupující do energetické bilance. Další parametrem pro výpočet výhřevnosti je chemické složení kalu. Chemické složení vychází z předchozích prací [10] a bylo uvedeno v kap. 2.1. Bilanční vypočet anaerobní stabilizace. V části anaerobní stabilizace je uveden i postup výpočtu výhřevnosti sušiny kalu pro směsný surový kal, anaerobně stabilizovaný kal a pro vytvořený bioplyn z procesu anaerobní stabilizace.

### 7.4.1. Složení spalin

Určení složení a množství spalin je důležité z hlediska návrhu velikosti systému čištění spalin a množství produkované páry. Složení spalin je určeno pomocí stechiometrických rovnic popisujících proces oxidace paliva v závislosti na zvoleném součiniteli přebytku vzduchu. Vypočtené složení spalin je použito pro určení entalpického toku spalin jako jeden ze vstupních parametrů bilance bloku spalování a produkce páry. V rámci přípravy vstupních

parametrů do výpočtového modelu v rozhraní W2E byl připraven výpočet v prostředí MS Excel.

Výpočet je založen na výpočtu spalování dle stechiometrických rovnic uvedených v kap. 6.1.1. Spotřeba vzduchu je dána potřebou kyslíku na kompletní oxidaci všech složek. Množství kyslíku, které je nutné dodat vzduchem pro stechiometrické spalování ( $\alpha_{vzd}=1$ ), lze vyjádřit rovnicí (41). Pro nadstechiometrické spalování ( $\alpha_{vzd}>1$ ) lze určit spotřebu kyslíku z rovnice (42).

$$n_{O_2,VZD}[\text{mol}] = n_{C,PAL} + n_{S,PAL} + \frac{n_{H_2,PAL} - \frac{n_{Cl,PAL}}{2} - \frac{n_{F,PAL}}{2}}{2} - n_{O_2,PAL} \quad (41)$$

$$n_{O_2,VZD,celk}[\text{mol}] = n_{O_2,VZD} \cdot \alpha_{vzd} \quad (42)$$

Z množství potřebného kyslíku lze určit množství vzduchu z rovnice (43) a produkci a složení spalín dle vztahů (44-52).

$$n_{VZD,celk}[\text{mol}] = \frac{n_{O_2,VZD,celk}}{x_{O_2,VZD}} \quad (43)$$

$$n_{O_2,SPAL}[\text{mol}] = n_{O_2,VZD,celk} - n_{O_2,VZD} \quad (44)$$

$$n_{H_2O,SPAL}[\text{mol}] = \frac{n_{VZD,celk}}{x_{H_2O,VZD}} + n_{H_2,PAL} - \frac{n_{Cl,PAL}}{2} - \frac{n_{F,PAL}}{2} + n_{H_2O,PAL} \quad (45)$$

$$n_{N_2,SPAL}[\text{mol}] = \frac{n_{VZD,celk}}{x_{N_2,VZD}} + \frac{n_{N,PAL}}{2} \quad (46)$$

$$n_{SO_2,SPAL}[\text{mol}] = n_{S,PAL} \quad (47)$$

$$n_{CO_2,SPAL}[\text{mol}] = \frac{n_{VZD,celk}}{x_{CO_2,VZD}} + n_{C,PAL} \quad (48)$$

$$n_{HCl,SPAL}[\text{mol}] = n_{Cl,PAL} \quad (49)$$

$$n_{HF,SPAL}[\text{mol}] = n_{F,PAL} \quad (50)$$

$$n_{Ar,SPAL}[\text{mol}] = \frac{n_{VZD,celk}}{x_{Ar,VZD}} \quad (51)$$

$$n_{SPAL,celk}[\text{mol}] = n_{O_2,SPAL} + n_{H_2O,SPAL} + n_{N_2,SPAL} + n_{SO_2,SPAL} + n_{CO_2,SPAL} + n_{HCl,SPAL} + n_{HF,SPAL} + n_{Ar,SPAL} \quad (52)$$

## 7.4.2. Bilanční výpočet spalování

Cílem výpočtu bilance spalování je určit, jaké množství přebytku vzduchu je nutné do spalovací komory přivést, aby ve spalovacím prostoru byla dosažena požadovaná teplota. Dle platné legislativy musí být teplota při spalování odpadů vyšší než 850 °C a zdržení 2s za posledním přívodem vzduchu [51] (v rámci výpočtů je uvažováno s teplotou 870 °C) v případě, že se nejedná o nebezpečné odpady s obsahem chloru větším než 1%. Pro tyto účely byl vytvořen bilanční výpočet pro spalování kalů v návaznosti na výpočet složení spalin uvedený v kap. 7.4.1. Tento výpočet byl upraven do výhodnější formy pro další využití za použití rozhraní VBA.

Celkovou bilanci procesu spalování lze popsat rovnicemi (53-55)

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} + Q_{ABS} \quad (53)$$

$$\sum Q_{in} = m_{Sludge} \cdot LHV_{Sludge} \cdot (1 - f_b) + V_{VZD, celk} \cdot i_{VZD} + V_{ZP} \cdot (LHV_{ZP} + i_{ZP}) + V_{VZD, ZP} \cdot i_{VZD, ZP} \quad (54)$$

$$\sum Q_{out} = m_{Sludge} \cdot s_{Sludge} \cdot (1 - f_b) \cdot i_{SPAL} + V_{ZP} \cdot s_{ZP} \cdot i_{SPAL, ZP} + m_{TH} \cdot i_{TH} + Q_{ztr} \quad (55)$$

## 7.4.3. Bilanční výpočet výroby páry

Volba vhodných parametrů vyráběné páry byla zvolena na základě výkonově podobného zařízení na energetické využívání odpadů o kapacitě 20 kt/rok [72] a [74]. V případě spalování kalů jsou zvoleny parametry páry o tlaku 1,4 MPa a teplotě 230 °C. Množství odluhu kotelní vody pro zařízení na spalování kalů činí zhruba 2 % z množství přiváděné vody a tepelné ztráty celého systému výměníků jsou zvoleny ve výši 1,25 % z přeneseného tepelného výkonu ve výměníku. Výstupní teplota spalin z HRSG je v provedeném výpočtu zvolena 240 °C, ale v rámci další části disertační práce (kap. 11 návrh technologické linky pro zpracování kalů) je upravena dle navrhované technologie čištění spalin. Bilanci lze vyjádřit pomocí rovnic (56) a (57).

$$\sum Q_{HRSG, in} = m_{SPAL, in} \cdot i_{SPAL} + m_{H_2O} \cdot i_{H_2O} \quad (56)$$

$$\sum Q_{HRSG, out} = m_{STEAM} \cdot i_{STEAM} + m_{SPAL} \cdot i_{SPAL, OUT} + m_{H_2O} \cdot i_{SAT} \cdot 0,03 + Q_{ztr} \quad (57)$$

## 7.4.4. Výroba elektrické energie

V rámci všech provedených výpočtů bude využito kogeneračního režimu. Předpokladem pro kogenerační režim je dostatečný odbyt tepelné energie, který je v případě technologické sestavy se sušárnou kalu zajištěn. Výstupní tlak z protitlaké turbíny je nastaven na 0,16 MPa, termodynamická účinnost je volena na základě množství páry, které je



produkováno na základě dokumentu [75], a elektromechanická účinnost turbíny je 95 %. Pára na výstupu z turbíny je používána pro výrobu teplé vody o teplotním spádu 90/70 °C.

## 7.5. Posouzení optimálního stupně vysušení kalu

Optimálně stupeň vysušení kalu ovlivňuje spotřeby energií zařízení sušárny a produkci energií v monospalovně kalů. Kombinací soustavy výpočtového modelu sušárny kalu (kap. 7.3) a monospalovny kalu kap. 7.4, byla provedena řada výpočtů pro různý stupeň sušiny kalu na výstupu ze sušárny. Aplikací sestaveného modelu pro výpočet spotřeby tepla při sušení kalů a modelu pro výpočet spalování a využití uvolněného tepla k výrobě energie bylo provedeno srovnání energetických nároků na přípravu suroviny a potenciálně dosažitelného energetického zisku využitím vzniklých spalin.

Byla provedena série výpočtů, při kterých byl volen proměnný stupeň vysušení mechanicky odvodněného kalu obsahujícího původně 30 % sušiny na výstupní obsah ze sušárny kalu 60 až 90% sušiny. Následně bylo uvažováno se spalováním takto vysušeného kalu za podmínek popsaných v kap. 7. Využití tepla vzniklých spalin bylo uvažováno ve variantě kogeneračního režimu (pára je využita přednostně pro výrobu elektrické energie a poté pro výrobu tepelné energie v horké vodě o teplotním spádu 90/70 °C) a bez výroby elektrické energie pouze s produkcí tepelné energie v horké vodě o stejných parametrech jako v případě kogeneračního režimu.

Tab. 24: Vstupní parametry odvodněného kalu na vstupu do pásové sušárny

Veličina	Jednotka	Velikost lokality pro ČOV		
		1 mil. EO	100 tis. EO	
Roční fond pracovní doby sušárny	h/r	7500		
Odpovídající roční zpracování sušiny ASK	kt/r	25	2,5	
Uvažovaný obsah sušiny ve vstupním odvodněném ASK	% hm.	30		
Požadovaný obsah sušiny po vysušení kalu	% hm.	90		
Zpracovatelské parametry sušárny	hodinový výkon zprac. odvodněného kalu	t/h	11,1	1,11
	počet paralelních linek	-	4	1
	vypočtený zpracovatelský výkon 1 linky	t/h	2,778	1,111
	zpracovatelský výkon 1 linky	t/h	2,775	1,111
	hodinová produkce vysušeného kalu v 1 lince	t/h	0,926	0,370
Výhřevnost vysušeného kalu	MJ/kg	8,996		
Množství odstraněné vody v jedné lince	t/h	1,850	0,741	

Množství zpracovávaného kalu bylo určeno dle bilance pro anaerobní stabilizaci, jak bylo popsáno v kap. 7.1, ve dvou kapacitních variantách. Zpracovatelské kapacity pro návrh sušárny jsou uvedeny v tab. 24. Tyto varianty vycházejí z množství produkovaného kalu pro čistírny odpadních vod 100 tis. EO (produkce sušiny směsného surového kalu 10 t/d) a 1 mil. EO (produkce sušiny směsného surového kalu 100 t/d). Pro zpracovatelskou kapacitu

varianty 1mil. EO, tedy množství odvodněného kalu 11,1 t/h o obsahu sušiny 30% je sušení kalu realizováno ve 4 paralelních linkách.

### 7.5.1. Sestava sušárny kalu a monospalování pro menší kapacity (100 tis. EO)

Pro simulaci chování technologického celku bylo použito schéma znázorněné v příloze 6 vytvořené pomocí programu W2E. Byly hodnoceny 3 varianty, sušení a spalování anaerobně stabilizovaného kalu s produkcí elektrické energie pomocí malé turbíny (tzv. točivé redukce), sušení a spalování anaerobně stabilizovaného kalu bez produkce elektrické energie a sušení a spalování směsného surového kalu.

Tab. 25: Výstupní parametry bilančního modelu nízkoteplotní sušárny kalu

Druh kalu	Označení proudu Obsah sušiny na výstupu ze suš. [%DS]	1	2		3		4	
		Odpar [kg/h]	Spotřeba tepla		Produkce NN tepla		Spotřeba EE	
			[MJ/h]	[MJ/(t kalu)]	[MJ/h]	[MJ/(t kalu)]	[kW]	[kWh/(t kalu)]
ASK	90	740	2239	2017	133	120	65	59
	85	718	2178	1962	129	117	63	57
	80	694	2110	1901	125	113	61	55
	75	666	2038	1836	120	108	59	53
	70	634	1955	1761	114	103	56	50
	60	555	1753	1579	100	90	49	44
SSK	90	1164	3521	2016	210	120	102	59
	85	1130	3424	1961	204	117	99	57
	80	1091	3316	1899	197	113	96	55
	75	1048	3193	1829	189	108	92	53
	70	998	3053	1748	180	103	88	50
	60	873	2700	1546	157	90	77	44

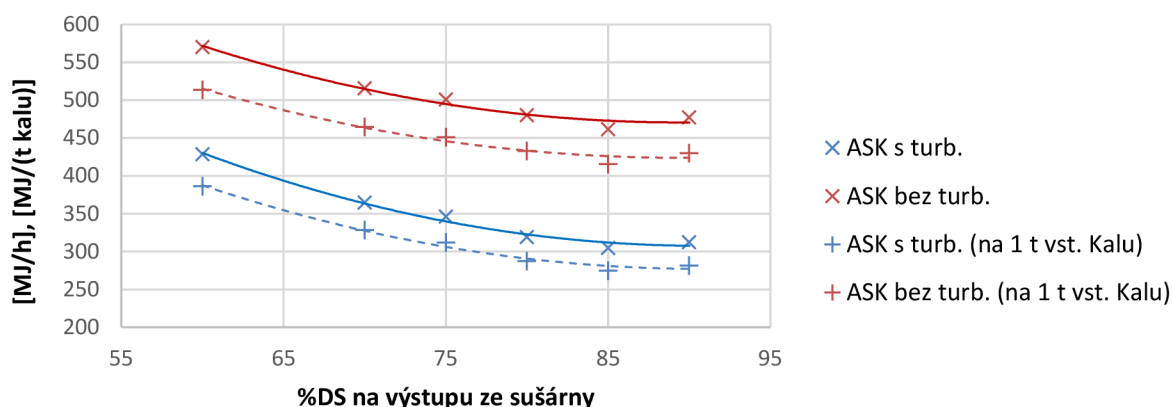
Výstupní hodnoty hlavních proudů z bilančního modelu pro část sušárny kalu jsou v tab. 25 a pro technologii spalování kalu v tab. 26.

Tab. 26: Výstupní parametry bilančního modelu spalování kalu

Druh kalu	Označení proudu Obsah sušiny na výstupu ze suš.	5	6	7	8	9	10	11	
	[%DS]	Prim.vzduch [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Sek. Vzduch [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Spaliny [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Příd. Palivo [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Produkce páry [kg/h]	Výroba EE pouze var. S turb. [kWh/h]	Tep. Výkon využ. Var. s výr. EE [MJ/h]	Var. Bez výr. EE [MJ/h]
ASK	90	1505	1055	2916	8,4	1237	44	2552	2717
	85	1490	990	2860	8,2	1203	43	2483	2639
	80	1450	935	2796	8,2	1179	42	2429	2590
	75	1390	890	2726	8,2	1155	41	2384	2538
	70	1300	850	2635	8,2	1121	40	2319	2471
	60	1100	745	2427	8,1	1046	37	2182	2323
SSK	90	3985	2700	7238	13,0	3034	108	6250	
	85	3900	2650	7145	13,0	3003	107	6192	
	80	3820	2580	7042	12,9	2965	106	6120	
	75	3720	2510	6926	12,8	2923	104	6039	
	70	3620	2420	6795	12,7	2874	103	5942	
	60	3340	2210	6459	12,3	2753	98	5712	

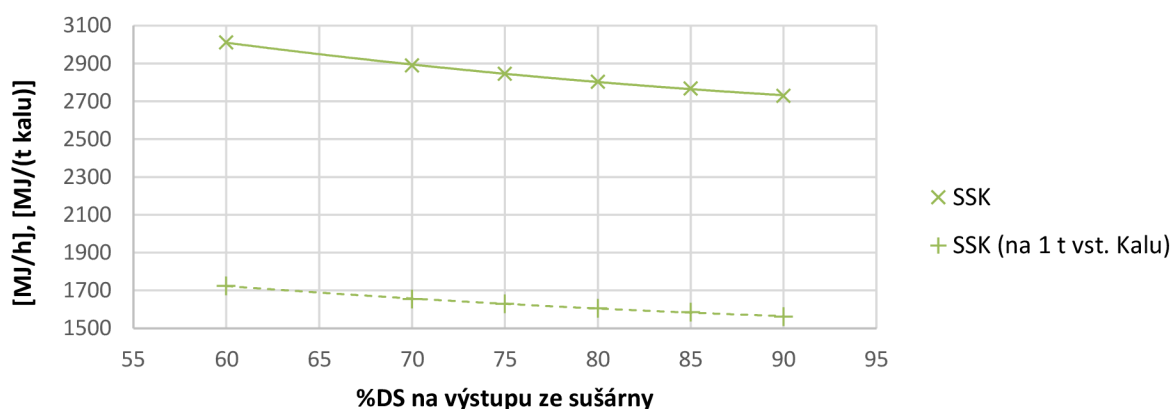
V grafu na obr. 30 je znázorněn výsledek tepelné bilance zpracovávající anaerobně stabilizovaný kal. Na výsledných závislostech bilancování produkce/spotřeby tepelné energie pro menší kapacity je patrná výhodnost sušení kalu v sušárně až na 90 % sušiny nehledě na to, zda bude kal okamžitě spalován, nebo skladován a odvážen k dalšímu zpracování do jiného zařízení.

I když tepelná bilance v této variantě vychází v mírné nadprodukci, nelze konstatovat, že by tato sestava sušárny a spalování kalu byla tepelně energeticky soběstačná. V zimních měsících je nutné zohlednit zvýšené provozní nároky spotřeby tepelné energie ve spalovně i v sušárně kalu (např. nižší teplota nasávaného vzduchu, provozní vody, kalu) a na vytápění provozních budov sušárny a spalovny kalu. Z těchto důvodů je vhodné doplnit technologii o další zdroj tepelné energie.



Obr. 30: Graf závislosti rozdílu produkce a spotřeby tepelné energie na výstupním obsahu sušiny kalu ze sušárny při zpracování anaerobně stabilizovaného kalu menších kapacit

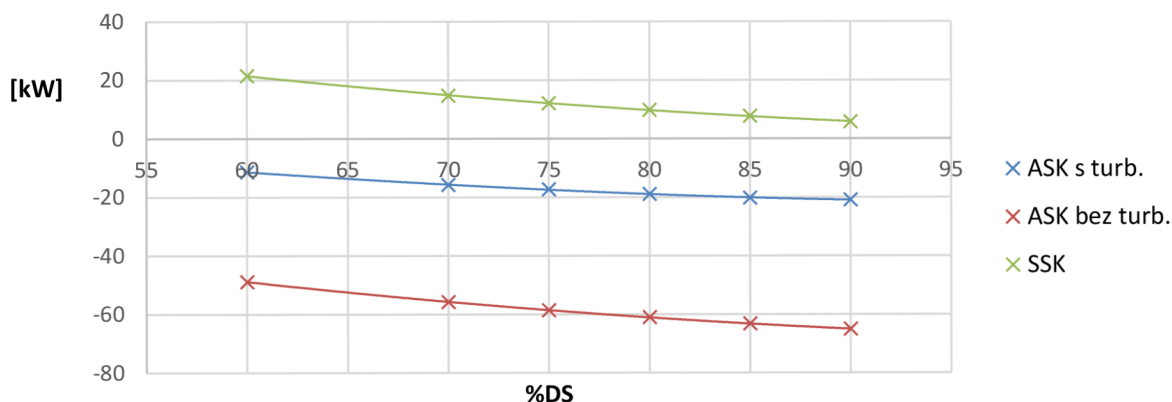
Při přímém spalování směsného surového kalu je při technologické sestavě sušárna a spalování kalu nadbytek produkce tepelné energie (obr. 31) a potvrzuje se předpoklad, že je výhodnější kal co nejméně sušit a spalovat kal o vyšším obsahu vody. V tomto případě lze konstatovat, že v této bilanci nejsou zahrnuty další zvýšené spotřeby zařízení spojené s vyšší produkcí spalin a s větším obsahem vody (např. vyšší spotřeba spalinových ventilátorů nebo větší dimenzování aparátů čištění spalin).



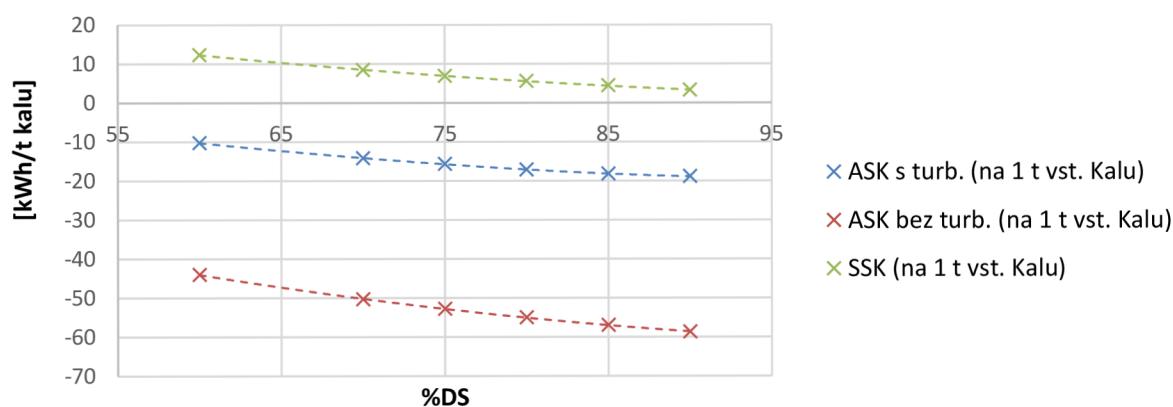
Obr. 31: Graf závislosti rozdílu produkce a spotřeby tepelné energie na výstupním obsahu sušiny kalu ze sušárny při zpracování směsného surového kalu menších kapacit

Produkce elektrické energie je u menších kapacit (zpracovatelská kapacita ČOV 100 tis. EO) nedostatečná a spotřeba elektrické energie na sušení kalu převyšuje produkci při spalování kalu (obr. 32 a měrná spotřeba na tunu vstupního kalu obr. 33). Zařazení turbíny a generátoru pro zařízení o malých výkonech je na zvážení, zda se do něho vyplatí investovat, protože výkon výroby elektrické energie v řádech několika desítek kilowat je zanedbatelný. Proto byla v této fázi do porovnání zařazena i varianta bez turbíny pouze s produkcí tepelné energie. Zařazením turbíny při přímém spalování směsného surového kalu se vyprodukuje více elektrické energie než je její spotřeba pro sušárny. Přesto ani v tomto případě není produkce elektrické energie výrazná a elektrický výkon okolo 100 kW stěží vystačí pro

provoz sušáren a to v bilanci není zahrnuta vlastní spotřeba elektrické energie pro provoz monospalování kalu (spotřeba motoru dopravníků, motoru kompresoru, pohon spalínových ventilátorů a dalších elektrických spotřebičů)



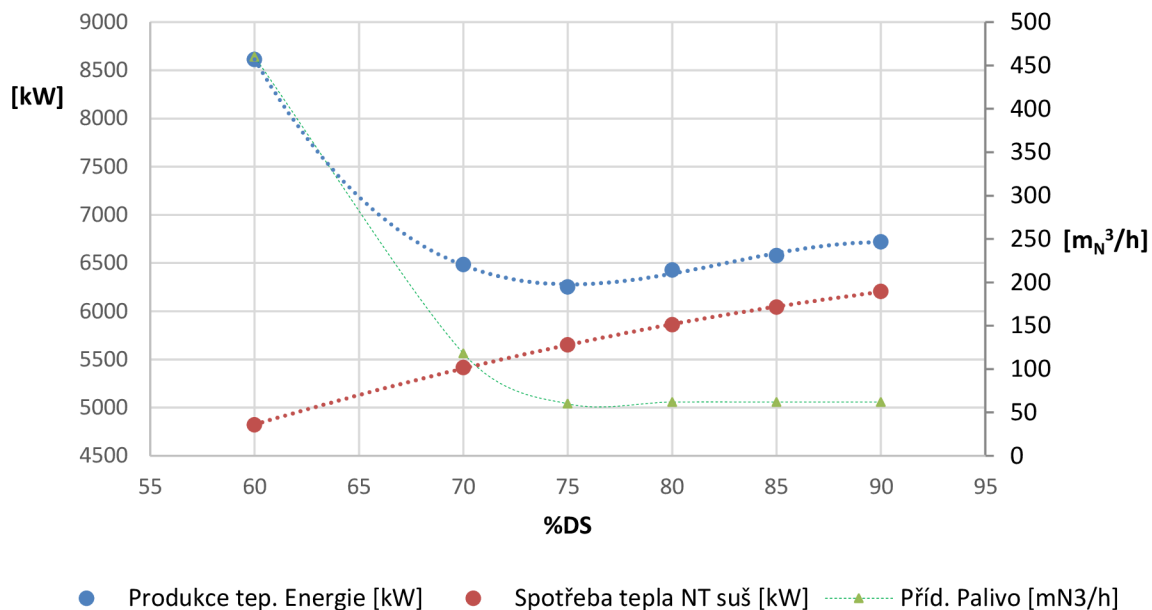
Obr. 32: Graf závislosti rozdílu produkce a spotřeby elektrické energie na výstupním obsahu sušiny kalu ze sušárny menších kapacit



Obr. 33: Graf závislosti rozdílu měrné produkce a spotřeby elektrické energie na výstupním obsahu sušiny kalu ze sušárny menších kapacit

## 7.5.2. Sestava sušárny kalu a monospalování pro větší kapacity (1 mil. EO)

Pro různé stupně výstupní sušiny kalu bylo porovnáno, jaký vliv má výstupní sušina kalu ze sušárny na energetickou náročnost v sestavě nízkoteplotní pásové sušárny a monospalovny kalu (Technologické výpočetní schéma je v Příloze 7). Vliv byl vyhodnocován pro variantu sušení 11,1 t/h anaerobně stabilizovaného kalu o vstupní sušině 30 %. Tato závislost je znázorněna v grafu na obr. 34.



Obr. 34: Graf vlivu změny obsahu výstupní sušiny ze sušárny kalu na množství produkované a spotřebované tepelné energie a zemního plynu

Jak je z grafu patrné, v rozmezí od 80 % sušiny kalu do 90 % sušiny, není výrazný rozdíl ve velikosti rozdílu mezi spotřebou a produkcí tepelné energie. Rozdíl nastává až pod 75 % množství sušiny kalu, kde je nutné do spalovny přidávat větší množství podpůrného paliva, aby bylo možné kal bez problému spalovat. Z důvodu minimalizace spotřeby přídavného paliva vychází optimální stupeň vysušení kalu v rozmezí 80 – 90 % sušiny. S přihlédnutím požadavku procesu pyrolýzy na minimální výhřevnost vstupního materiálu min. 10 MJ/kg [60], bylo v rámci dalšího hodnocení v kap. 9 uvažováno s výstupní sušinou kalu z nízkoteplotní sušárny 90 % sušiny. Kal vysušený na 90 % sušiny je výhodný i z pohledu delšího skladování sušeného kalu, protože kal je dostatečně hygienizován a nedochází k jeho samovolné zpětné kontaminaci.

## 8. Posouzení provozně technologických podmínek spoluspalování s uhlím

Spoluspalováním kalů s dalšími palivy se zabývá celá řada prací, například spoluspalováním s uhlím [76], s odpadem [77], případně s biomasou [78], nebo v cementářských pecích [78], a nebo účinku přísad do spalovacího zařízení na kinetiku spalování a termodynamický proces spoluspalování [79]. V rámci této části práce jsou posouzeny možnosti spoluspalování kalů s uhlím nebo odpadem. Spalování kalů je prováděno za využití již existujícího zařízení nebo v nově vybudovaném zařízení. Pro tento účel je využita modifikace modelu vytvořeného v předchozích bodech. Úprava modelu spočívá v rozšíření bilance stechiometrického spalování o více druhů paliv. Další změny jsou v technologii kotle, v úpravě parametrů produkované páry a v systému čištění spalin.

V rámci přípravy této části disertační práce, bylo vytvořeno v aplikaci MS Excell několik variant stechiometrických a bilančních výpočtů pro spoluspalování kalů:

- Spoluspalování kalu společně s uhlím v poměru 1:10
- Spoluspalování kalu společně s uhlím v poměru 1:1
- Spoluspalování kalu společně s odpadem v poměru 1:2
- Spalování kalu v separátní lince se společným využitím produkované páry (kal:uhlí=1:10)

Postup výpočtů vychází z rovnic (40-51) uvedených v kap. 7.4, které je nutné upravit pro dvě rozdílná paliva. Úpravu vztahu pro stechiometrické spalování udává rovnice (58). Pro nadstechiometrické spalování se vztah (42) nezmění, pouze místo  $n_{O_2,VZD}$  je nutné dosadit  $n_{O_2,VZD,SS}$ . Rovněž se nezmění vztah pro množství vzduchu (43). Pro složení spalin je nutné upravit rovnice (43-51) do tvaru (59-67).

$$n_{O_2,VZD,SS}[\text{mol}] = \left( n_{C,PAL,1} + n_{S,PAL,1} + \frac{n_{H_2,PAL,1} - \frac{n_{Cl,PAL,1}}{2} - \frac{n_{F,PAL,1}}{2}}{2} - n_{O_2,PAL,1} \right) \cdot \frac{n_{PAL,1}}{n_{CELK}} + \left( n_{C,PAL,2} + n_{S,PAL,2} + \frac{n_{H_2,PAL,2} - \frac{n_{Cl,PAL,2}}{2} - \frac{n_{F,PAL,2}}{2}}{2} - n_{O_2,PAL,2} \right) \cdot \frac{n_{PAL,2}}{n_{CELK}} \quad (58)$$

Z množství potřebného kyslíku lze určit množství vzduchu z rovnice (18) a produkci a složení spalin dle vztahu (35-42).

$$n_{O_2,SPAL,SS}[\text{mol}] = n_{O_2,VZD,celk} - n_{O_2,VZD,SS} \quad (59)$$

$$n_{\text{H}_2\text{O,SPAL,SS}}[\text{mol}] = \frac{n_{\text{VZD,celk}}}{x_{\text{H}_2\text{O,VZD}}} + \left( n_{\text{H}_2,\text{PAL},1} - \frac{n_{\text{Cl,PAL},1}}{2} - \frac{n_{\text{F,PAL},1}}{2} + n_{\text{H}_2\text{O,PAL},1} \right) \cdot \frac{n_{\text{PAL},1}}{n_{\text{CELK}}} + \left( n_{\text{H}_2,\text{PAL},2} - \frac{n_{\text{Cl,PAL},2}}{2} - \frac{n_{\text{F,PAL},2}}{2} + n_{\text{H}_2\text{O,PAL},2} \right) \cdot \frac{n_{\text{PAL},2}}{n_{\text{CELK}}} \quad (60)$$

$$n_{\text{N}_2,\text{SPAL,SS}}[\text{mol}] = \frac{n_{\text{VZD,celk}}}{x_{\text{N}_2,\text{VZD}}} + \frac{n_{\text{N,PAL},1}}{2} \cdot \frac{n_{\text{PAL},1}}{n_{\text{CELK}}} + \frac{n_{\text{N,PAL},2}}{2} \cdot \frac{n_{\text{PAL},2}}{n_{\text{CELK}}} \quad (61)$$

$$n_{\text{SO}_2,\text{SPAL,SS}}[\text{mol}] = n_{\text{S,PAL},1} \cdot \frac{n_{\text{PAL},1}}{n_{\text{CELK}}} + n_{\text{S,PAL},2} \cdot \frac{n_{\text{PAL},2}}{n_{\text{CELK}}} \quad (62)$$

$$n_{\text{CO}_2,\text{SPAL,SS}}[\text{mol}] = \frac{n_{\text{VZD,celk}}}{x_{\text{CO}_2,\text{VZD}}} + n_{\text{C,PAL},1} \cdot \frac{n_{\text{PAL},1}}{n_{\text{CELK}}} + n_{\text{C,PAL},2} \cdot \frac{n_{\text{PAL},2}}{n_{\text{CELK}}} \quad (63)$$

$$n_{\text{HCl,SPAL,SS}}[\text{mol}] = n_{\text{Cl,PAL},1} \cdot \frac{n_{\text{PAL},1}}{n_{\text{CELK}}} + n_{\text{Cl,PAL},2} \cdot \frac{n_{\text{PAL},2}}{n_{\text{CELK}}} \quad (64)$$

$$n_{\text{HF,SPAL,SS}}[\text{mol}] = n_{\text{F,PAL},1} \cdot \frac{n_{\text{PAL},1}}{n_{\text{CELK}}} + n_{\text{F,PAL},2} \cdot \frac{n_{\text{PAL},2}}{n_{\text{CELK}}} \quad (65)$$

$$n_{\text{Ar,SPAL}}[\text{mol}] = \frac{n_{\text{VZD,celk}}}{x_{\text{Ar,VZD}}} \quad (66)$$

$$n_{\text{SPAL,celk,SS}}[\text{mol}] = n_{\text{O}_2,\text{SPAL,SS}} + n_{\text{H}_2\text{O,SPAL,SS}} + n_{\text{N}_2,\text{SPAL,SS}} + n_{\text{SO}_2,\text{SPAL,SS}} + n_{\text{CO}_2,\text{SPAL,SS}} + n_{\text{HCl,SPAL,SS}} + n_{\text{HF,SPAL,SS}} + n_{\text{Ar,SPAL}} \quad (67)$$

Výše uvedené výpočty lze snadno upravit pro různé složení paliva. Je možné měnit vstupní chemické složení paliv, poměr paliv při spoluspalování, složení spalovacího vzduchu, parametry páry na výstupu z turbíny a další parametry ovlivňující množství a složení produkovaných spalin a s tím související produkci energií. Chemické složení paliv vstupující do výpočtu je uvedeno v tab. 27.

Jednotlivá specifika každé varianty a přístup k bilančním výpočtům je uveden dále v textu spolu se schémata technologií. Spalování probíhá ideálně, takže dochází k úplné oxidaci všech složek. Nedokonalost spalování reprezentují pouze ztráty kotle a nedopal kotle, který je volen 1 % z kalorické hodnoty paliva. Tepelné ztráty kotle budou v reálném případě závislé na výkonu, ale pro zjednodušení výpočtu jsou uváděny 2 GJ/h [12]. Ztrátové teplo označované dále ve schématu jednotlivých variant technologií  $Q_{\text{loos}}$  reprezentuje tepelné ztráty v případě nižší poptávky po teple a nutnosti dochlazování před vstupem kondenzátu do nádrže napájecí vody.

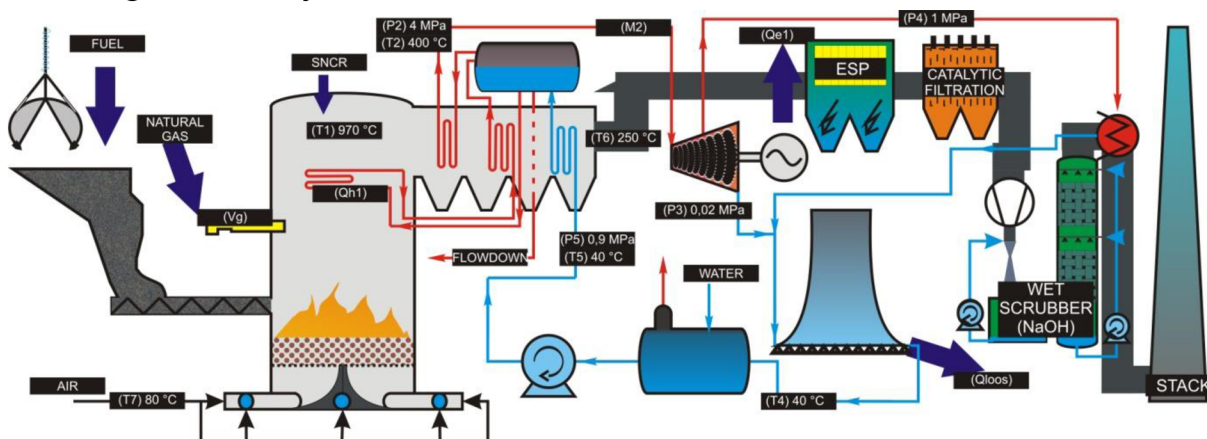


Tab. 27: Vstupní chemické složení paliv pro varianty spoluspalování 1-4

		Kal	Uhlí	Odpad
Hořlavina	[%hm]	31,98	61,00	43,00
Voda	[%hm]	35,00	29,00	22,00
Popeloviny	[%hm]	33,02	10,00	35,00
C	[%hm]	62,70	73,28	60,27
H	[%hm]	8,27	5,74	6,51
N	[%hm]	7,38	0,82	8,30
O	[%hm]	19,45	18,52	24,82
S	[%hm]	2,22	1,64	0,05
Cl	[%hm]	0,00	0,00	0,05
LHV	[MJ/kg]	8,48	17,16	10,53

## 8.1. Varianta 1: Spoluspalování kalu společně s uhlím v poměru 1:10

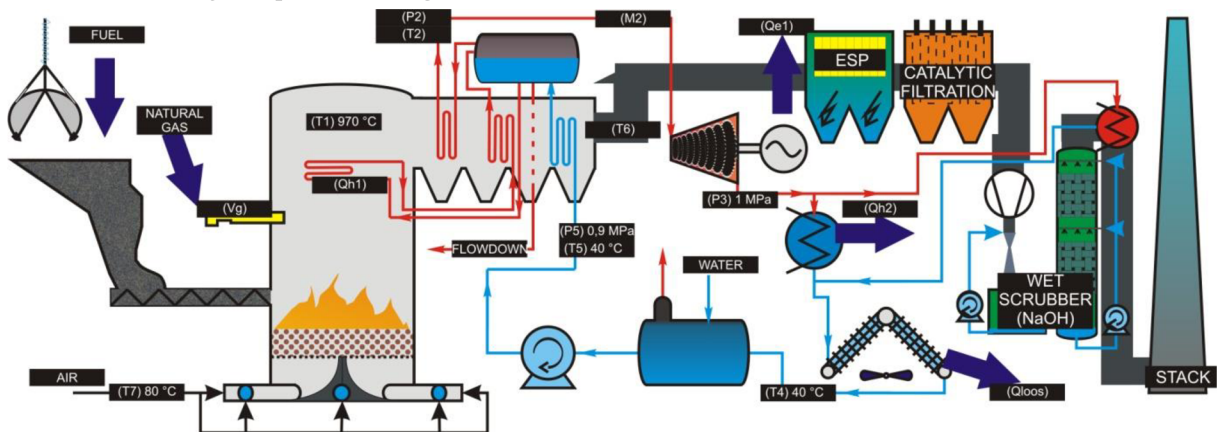
Návrh této technologie vychází z úpravy stávající technologie uhelné elektrárny. Uvažuje se zde s dávkováním kalu ke spalovanému uhlí v poměru 1:10. Protože většina uhelných elektráren pracuje v režimu maximální produkce elektrické energie, nepředpokládá se žádný export tepelné energie, čemuž odpovídají i výstupní parametry pracovního média na výstupu z turbíny. V případě této technologie se nepředpokládá, že by bylo nutné spalování dalšího podpůrného paliva (zemního plynu), jako v případě spalování kalu (kap. 7.4). Vzhledem k emisním limitům pro stacionární zdroje a snižování emisí oxidu síry je předpokládáno, že systém čištění spalin ve stávající technologii již obsahuje elektrostatický odlučovač a mokrou vypírku. Z tohoto důvodu je navrženo doplnění o katalytickou filtraci. Tento návrh zatím není podložen výpočtem a posouzení, zda by technologie splňovala přísné emisní limity pro spalování odpadů, může být předmětem navazujících prací. Technologické schéma je znázorněno na obr. 35.



Obr. 35: Technologické uspořádání spoluspalování v existující uhelné elektrárně

## 8.2. Varianta 2: Spoluspalování kalu společně s uhlím v poměru 1:1

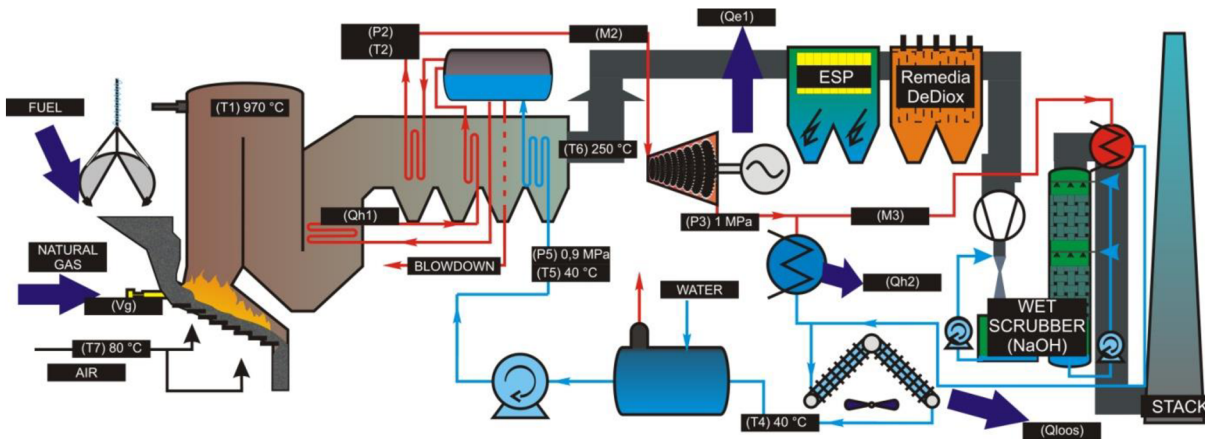
Varianta 2 vychází z varianty spalování kalů a technologické schéma bude totožné s variantou v kap. 8.1 a je znázorněno na obr. 36. Jediným rozdílem je spalování kalu společně s uhlím v poměru 1:1. Tento způsob spoluspalování má za následek zvýšení kalorického obsahu vstupního paliva a tím efektivnější spalování a vyšší produkci energií. Velkou nevýhodou tohoto řešení je nutná dodávka uhlí a vzhledem k většímu množství paliva i větší množství vzniklých spalin, které je nutné čistit.



Obr. 36: Technologické uspořádání spoluspalování s uhlím v novém zařízení

## 8.3. Varianta 3: Spoluspalování kalu společně s odpadem v poměru 1:2

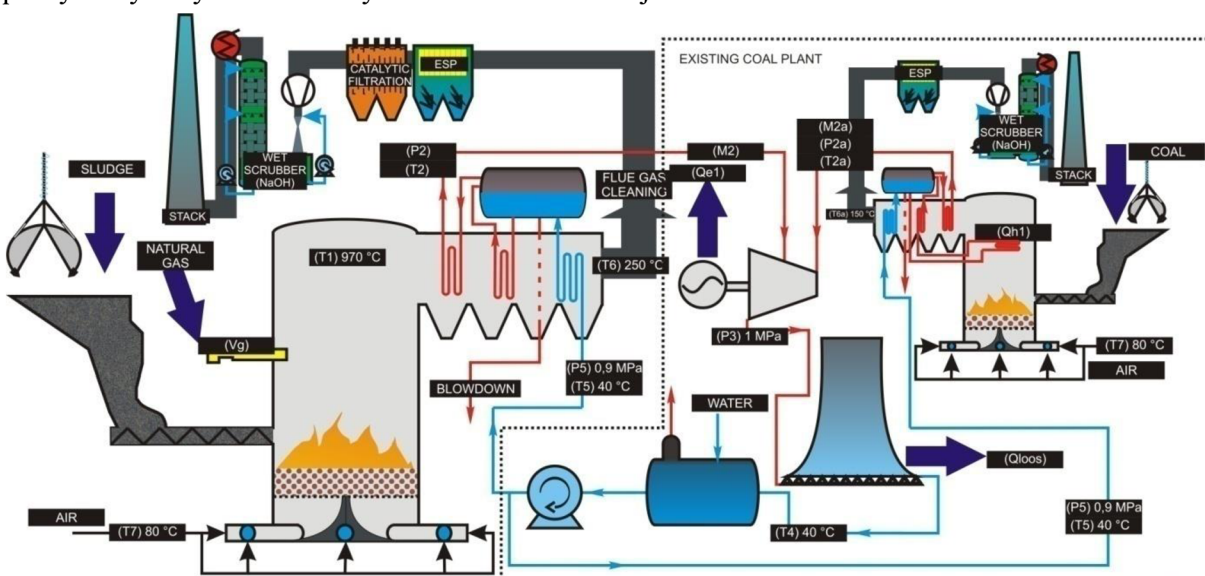
Tato varianta se zdá nejvýhodnější z hlediska systému čištění spalin, kde by nemělo docházet k výrazným investičním nárokům. Spalování odpadu musí splňovat přísné emisní limity a tak by v případě spoluspalování s kalem mělo být dostačující. S problémem by se mohl potýkat proces spalování, protože pro spalování odpadu se obvykle využívá roštových ohnišť. Aby nedošlo k zalepování roštů nebo protékání kalu roštem je nutné dostatečné vysušení a úprava kalu. Varianta 3 je modifikací varianty 2 pouze s rozdílným primárním palivem a jiným typem ohniště. V rámci příspěvku na konferenci PRES 2013 [12] bylo uvažováno se stejným složením čištění spalin jako v předchozích variantách, rozšířeným o selektivní nekatalytickou redukci, která je běžně užívána u zařízení na energetické využívání odpadů. Stručné technologické schéma znázorňuje obr. 37.



Obr. 37: Technologické uspořádání spalování s odpadem

#### 8.4. Varianta 4: Spalování kalu v separátní lince se společným využitím produkované páry (kal:uhlí=1:10)

Poslední varianta je základem technologie podobná variantě 1. Opět se využívá části technologie již stávající uhelné elektrárny. Rozdíl oproti druhé variantě je, že spalování kalů a uhlí probíhá v oddělených linkách se společným energetickým centrem (využitím produkované páry). Tato varianta umožňuje využít výhod prvních dvou variant. Vzhledem k oddělenému procesu spalování pro každé palivo není nutné investovat do systému čištění spalin s vysokým průtokem, ale pro splnění přísnějších emisních limitů pro spalování odpadů postačí výrazně čistit pouze spaliny vzniklé ze spalování kalů. Druhou výhodou oproti první variantě je snížení investičních nákladů o energetické centrum. Důležité je opět zmínit, že může vzniknout rozdíl ve výstupních parametrech páry jednotlivých kotlů. Technologické řešení umožňující variantu realizovat, může znamenat další investiční náklady, které mohou převýšit výhody této varianty. Navrhované řešení je zobrazeno na obr. 38.



Obr. 38: Technologické uspořádání spalování v oddělených ohništích

Cílem vytvořených modelů pro varianty 1-4 je zjistit, jaké množství energií je možné pomocí různých variant vyprodukovat. V tab. 28 je uvedené vypočtené složení spalin a v tab. 29 některé vstupní a vypočtené parametry včetně porovnání produkce energií.

Tab. 28: Složení vzniklých spalin pro varianty 1-4

Složení spalin		V1	V2	V3	V4
O <sub>2</sub>	[%vol]	8,63	11,47	9,21	9,19
CO <sub>2</sub>	[%vol]	9,25	6,84	8,12	7,68
N <sub>2</sub>	[%vol]	71,45	71,77	69,63	67,08
Ar	[%vol]	0,87	0,87	0,84	0,82
SO <sub>2</sub>	[%vol]	0,08	0,06	0,02	0,06
HCl	[%vol]	0,00	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub> O	[%vol]	9,73	8,99	12,18	15,17

Tab. 29: Vstupní parametry a výsledné produkce energií pro varianty 1-4

	Označení	Jednotka	V1	V2	V3	V4
Přídavné palivo (zemní plyn)	(Vg)	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	0	10	10	0
Přebytek vzduchu	(α)	[-]	1,82	2,47	1,98	1,60
Teplo absorbované ve spal. Komoře	(Qh1)	[GJ/h]	246	0	26	245
Množství vyrobené páry	(M2)	[kg/h]	275811	38217	41792	9189
Množství vyrobené páry	(M2a)	[kg/h]	-	-	-	278699
Tlak páry	(P2)	[MPa]	17,5	4,0	4,0	4,0
Tlak páry	(P2a)	[MPa]	-	-	-	17,5
Teplota páry	(T2)	[°C]	540	400	400	540
Isoentropická účinnost turbíny		[-]	0,85	0,70	0,75	0,85
Produkce elektřiny na 1t sušiny kalu	(Q <sub>e1</sub> )	[MW/t suchého kalu]	0,270	0,059	0,067	0,272
Produkce užitého tepla na 1t sušiny kalu	(Q <sub>h2</sub> )	[GJ/(h*t suchého kalu)]	0,0	10,8	11,0	0,0

Protože součástí každé technologie nejsou jen aparáty energií produkující, ale také aparáty, pro které je nezbytné energii dodávat, je nutné posoudit a vyčíslit spotřebovanou energii nezbytnou pro provoz zařízení. Lze sem zařadit energii pro pohon různých dopravníků (dávkování paliva, odvod tuhých residuí, dávkování sorbentů v systému čištění spalin), pohon čerpadel, pohon spalínového ventilátoru a dodávky tepelné energie (zpětný ohřev spalin, předhřev spalovacího vzduchu, předehřev paliva, sušení paliva). Některé technologické spotřeby energií jsou závislé na zvoleném návrhu systému čištění spalin (FGT).

Pro návrh FGT je podstatný vstupní proud spalin, jeho složení a průtok. Zjištění množství produkovaných emisí za spalovací komorou je značně problematické. Nejvhodnější metodou je zjištění pomocí experimentálního spalování pro různé kombinace paliv a provedení analýzy spalin. Protože tato metoda je velice nákladná a časově náročná, bylo snahou získat některá data studiím již publikovaných materiálů [80]-[87], jehož výsledky

byly částečně publikovány v rámci příspěvku na PRESS 2013 [12]. Vytvořené emise byly dále snižovány dle účinností jednotlivých aparátů FGT, které vychází z údajů v BREF/BAT a byly shrnuty v disertační práci Kropáče [50].

## 9. Technologické uspořádání kalové koncovky pro různé kapacity v ČR

Vzhledem k potenciálnímu množství dostupného kalu pro termické zpracování byla zvolena dvě variantní kapacitní řešení. Varianta 1 představuje produkci sušiny kalu ČOV s kapacitou 100 tis. EO, což je 10 t sušiny směsného surového kalu denně. Pro variantu 2 je zvolena produkce směsného surového kalu ČOV s kapacitou 1 mil. EO představující množství produkované sušiny směsného surového kalu ve výši 100 t denně. Pro obě kapacitní varianty je užito porovnání přímého spalování směsného surového kalu s různými postupnými úpravami zahrnujícími anaerobní stabilizaci s produkcí bioplynu využívaného v kogeneračních jednotkách. Měrná spotřeba tepla pro anaerobní stabilizace je zvolena 2,8 GJ/t sušiny vstupujícího SSK [59] a spotřeba páry termické hydrolýzy 1,4 GJ/t sušiny vstupujícího SSK [88]. Měrná produkce/spotřeba energií na tunu sušiny vstupujícího SSK a celkové porovnání variant je uvedeno dále v kap. 9.5.

### 9.1. Kapacitní řešení 1: Kapacita pro lokality cca 100 tis. EO

Při této kapacitě lze uvažovat s variantami s anaerobní stabilizací kalu kombinujících různé druhy předpravy kalu v kombinaci s termickým procesem. Termický proces je ve dvou variantách, pomocí monospalovny kalu nebo kompaktní kontejnerové pyrolýzní jednotky. Tyto varianty jsou pak porovnány se spalováním směsného surového kalu, který je odvodněn pomocí odstředivek, vysušen nízkoteplotní sušárnou a spalován v monospalovně kalu.

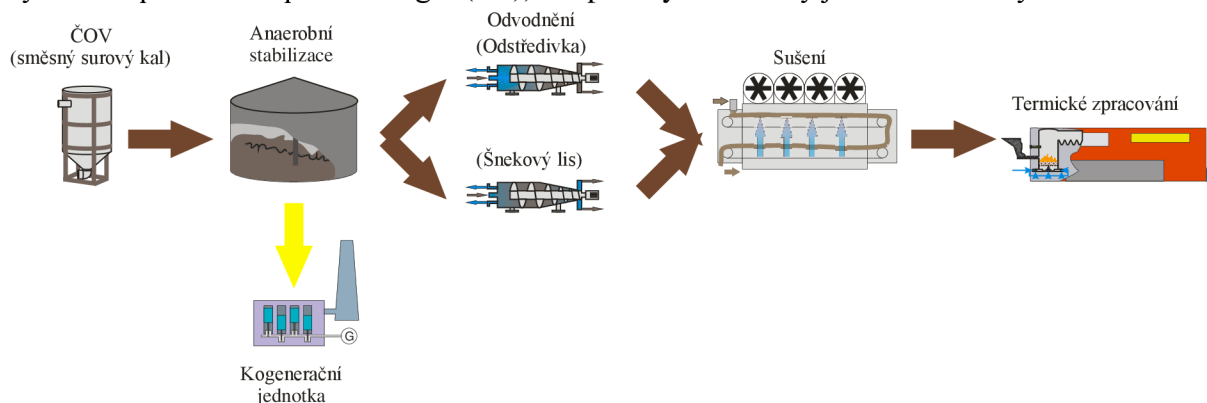
#### 9.1.1. Varianta 1, 1a a 1b: Anaerobní stabilizace a spalování anaerobně stabilizovaného kalu (MAS, KGJ, CEN/SCREW, DRYER, MINC)

Varianty 1 a 1a se stávají z mezofilní anaerobní stabilizace, ze které je produkovaný bioplyn odváděn a jímán v plynovém zásobníku a následně využíván v kogeneračních jednotkách pro výrobu elektrické energie a tepla. Anaerobně stabilizovaný kal s obsahem sušiny v rozmezí 3–6 % prochází přes macerátor (případně drtič) a je čerpán ve variantě 1 na odstředivku. Ve variantě 1a je místo odstředivky použit šnekový lis. Z odstředivky odvodněný kal vypadává o 30% sušiny do bunkru na odvodněný kal. V případě užití šnekového lisu je výstupní sušina kalu 25 %. Z bunkru je kal čerpán do distributoru sušárny a v sušárně sušen na sušinu v rozmezí 60–90 %. Vysušený kal je ze sušárny vynášen šnekovými dopravníky a pomocí pneumatické dopravy „foukán“ do sila na sušený kal. Ze sila současně sloužícího pro vyrovnávání nerovnoměrností v produkci sušeného kalu a kalu, který je dále zpracováván, je kal dopravován do násypky rotační spalovací komory v zařízení pro monospalování kalu. Kal je spalován při teplotě 870°C.



Popel vznikající při spalování kalu je vynášen přes mokrý výpad do kontejneru, následně vyvážen na skládku, případně do dalšího zařízení, ve kterém bude docházet k získávání fosforu z popela [89], [90] a [91].

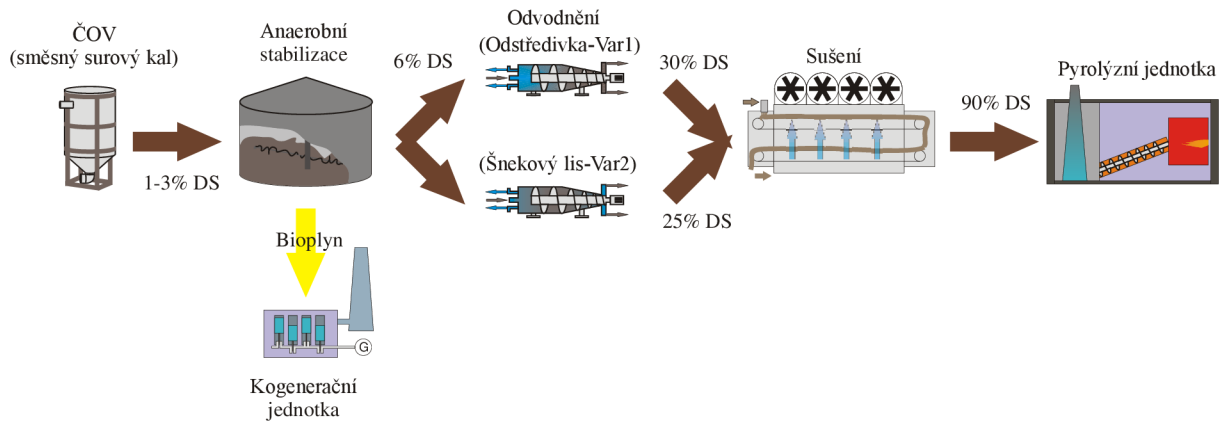
Spaliny z dohořivací komory proudí přes kotel na odpadní teplo, ve kterém jsou ochlazovány na teplotu 240 °C a využívány pro výrobu páry. Z kotle na odpadní teplo jsou vedeny do systému čištění spalin. Produkovaná pára je využívána pro výrobu elektrické energie (EE) (pouze Varianty 1 a 1a, u Varianty 1b je vynechána turbína a veškerá pára se využívá k produkci tepelné energie (TE)) a tepla. Tyto varianty jsou znázorněny na obr. 39.



Obr. 39: Schéma varianty 1 a 1a složené z anaerobní stabilizace, odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování

### 9.1.2. Varianta 2 a 2a: Anaerobní stabilizace a pyrolýza anaerobně stabilizovaného kalu (MAS, KGJ, CEN/SCREW, DRYER, PYR)

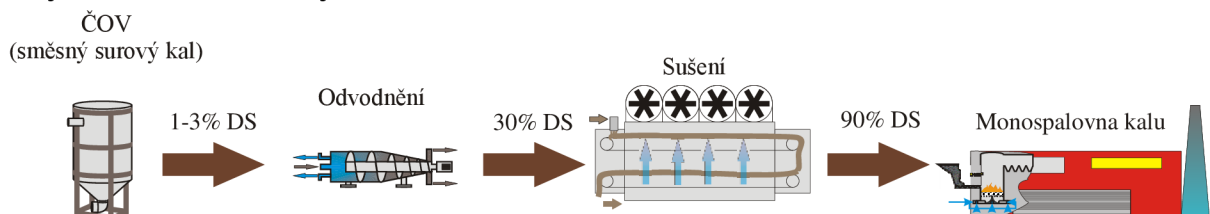
Tyto varianty vychází z předchozího řešení kalové koncovky varianty 1 a 1a. Rozdíl u variant 2 a 2a je v nahrazení zařízení na monospalování kalu dvěma paralelními linkami kompaktní pyrolýzní jednotky. Produkt z pyrolýzy (karbonizovaný kal) je veden sérií dopravníků do kontejneru, ze kterého je odvážen k dalšímu využití v zemědělství, případně skládkován. Pyrolýzní plyn je přímo spalován v plynovém hořáku a tepelná energie produkovaných spalin se využívá pro proces pyrolýzy. Přebytečná tepelná energie je ze spalin ve výměníku spaliny/voda převedena do horké vody s teplotním spádem 90/70 °C. Kompaktní pyrolýzní jednotka je schopná produkovat přebytečnou tepelnou energii až 5,84 MJ/kg vstupního kalu. To odpovídá výkonu výměníku 300 kWh/h tepelné energie při zpracovatelské kapacitě 185 kg/h vysušeného kalu. Varianty 2 a 2a jsou znázorněny na obr. 40.



Obr. 40: Schéma varianty 2 a 2a složené z anaerobní stabilizace, odvodnění, nízkoteplotního sušení a termické zpracování v pyrolýzní jednotce

### 9.1.3. Varianta 3: Přímé spalování směšného surového kalu (CEN, DRYER, MINC)

Tato varianta slouží jako porovnání k předchozím variantám a je modifikací varianty 1. Ve variantě 3 je vynechán biologický stupeň anaerobní stabilizace kalu a není produkován žádný bioplyn, který by byl využíván v kogeneračních jednotkách. Veškerý směsný surový kal je odvodněn, v nízkoteplotní sušárně vysušen a spalován. Počínaje technologickou částí odvodnění se shoduje tato varianta s variantou 1 s tím rozdílem, že jsou úměrně navýšeny kapacity zařízení, neboť množství sušiny SSK je oproti množství sušiny ASK téměř dvojnásobné. Varianta 3 je znázorněna na obr. 41.

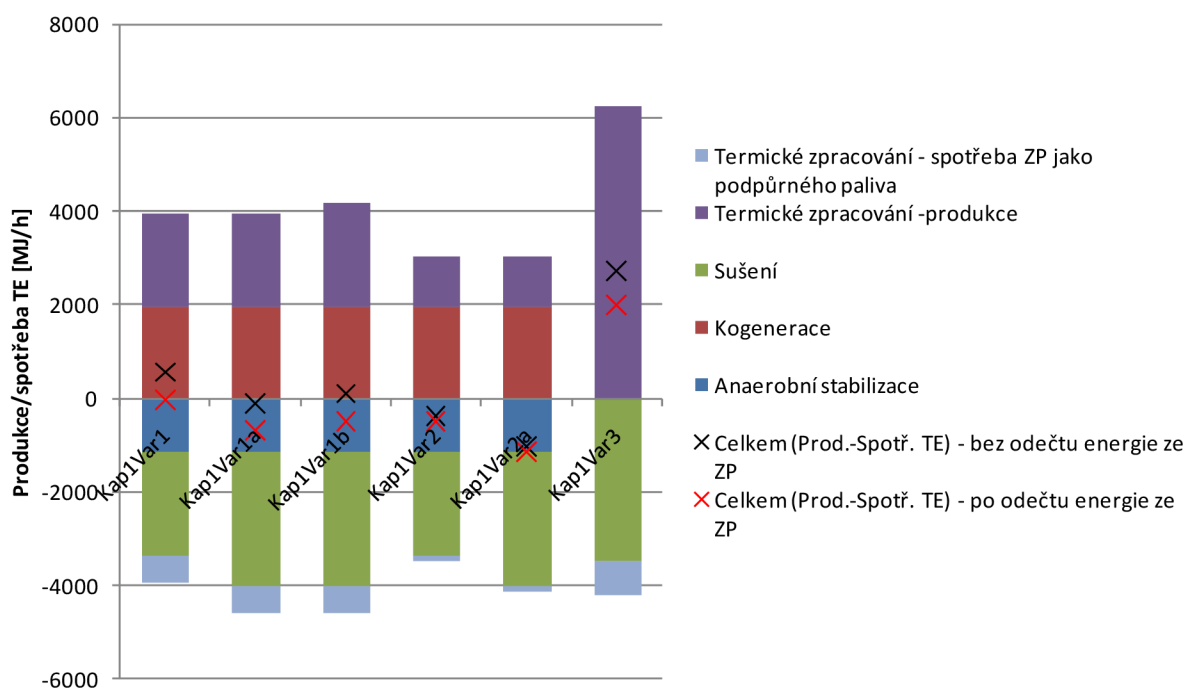


Obr. 41: Schéma varianty 3 složené z odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování

## 9.2. Výkonové porovnání kapacity pro lokality cca 10 tis. EO

V obr. 42 je znázorněno porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby energií. Je zde záměrně znázorněna bilance tepelné energie bez energie vnesené do termického procesu spalováním zemního plynu. Množství zemního plynu je nezbytné pro správnou funkci termického stupně kalové koncovky a nemá vliv na dimenzování kapacity kogeneračních jednotek, případně přídavného kotle, pokud vychází celková tepelná bilance kalové koncovky negativně (v grafu na obr. 42 a tab. 30 uvedeno jako „Celkem TE - bez odečtu energie ze ZP“).





Obr. 42: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby tepelné energie menších kapacit

Tab. 30: Spotřeby a produkce tepelné energie v jednotlivých procesech kalové koncovky menších kapacit

Proces	Veličina	Jednotka	Kap1 Var1	Kap1 Var1a	Kap1 Var1b	Kap1 Var2	Kap1 Var2a	Kap1 Var3
Anaerobní stabilizace	Spotřeba TE	[MJ/h]	1167	1167	1167	1167	1167	-
Kogenerace	Produkce EE	[kWh/h]	347	347	347	347	347	-
	Produkce TE	[MJ/h]	1934	1934	1934	1934	1934	-
Odvodnění	Spotřeba EE	[kWh/h]	14	4	14	14	4	20
Sušení	Spotřeba EE	[kWh/h]	67	87	87	67	87	105
	Spotřeba TE	[MJ/h]	2233	2892	2892	2233	2892	3512
Termické zpracování	Spotřeba EE	[kWh/h]	100	100	100	24	24	150
	Spotřeba ZP	[m <sup>3</sup> /h]	25,8	25,8	25,8	4,0	4,0	33,0
	Produkce EE	[kWh/h]	37	37	-	-	-	95
	Produkce TE	[MJ/h]	2014	2014	2219	1071	1071	6250
Celkem EE		[kWh/h]	203	193	146	254	244	-180
Celkem TE - bez odečtu energie ze ZP		[MJ/h]	547	-112	94	-395	-1054	2737
Celkem TE se zahrnutím energie vnesené ZP		[MJ/h]	-19	-678	-472	-483	-1142	2013

V případě varianty 1a a obou variant 2 a 2a s pyrolýzní jednotkou je tepelná bilance záporná a je nutné přidat do procesu další tepelnou energii. Tato energie může být dodána ve formě odpadního tepla z energetických zdrojů dostupných v blízkém okolí. Další možností je navýšení výkonu kogeneračních jednotek tak, aby pokryly zvýšenou spotřebu tepla, případně

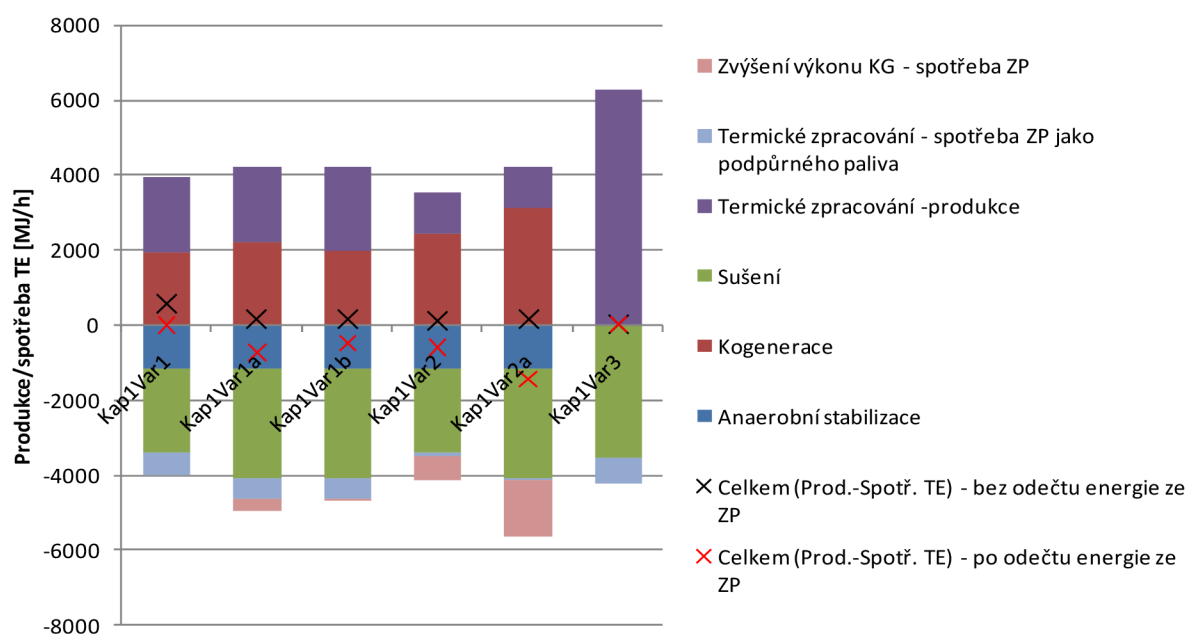
doplnit další zařízení k produkci tepelné energie, např. kotel na zemní plyn nebo jiné palivo. Jako výhodná se jeví součinnost se zařízením na energetické využití odpadů, čímž by bylo možné tepelný deficit do procesu získat z odpadního tepla tohoto zařízení. Soupis energetických toků je uveden v tab. 30.

Spotřeba tepelné energie v sušárně je závislá na teplotě čerstvého vzduchu (blíže kap. 7.3.2), který je do sušárny nasáván. Z tohoto důvodu musí být pokryta i zvýšená spotřeba v zimních měsících. V rámci výpočtu je uvažováno s navýšením výkonu v kogeneračních jednotkách spalováním ZP na pokrytí nedostatku TE. V případě zvýšené spotřeby TE nízkoteplotní sušárny kalu o 5 % v zimním období, vzniká nedostatek tepla kromě variant 1a, 2 a 2a, také u varianty 1b, ve které byla bilance tepelné energie při návrhových hodnotách kladná. Celkový přehled úpravy výkonu kogenerační jednotky je uveden v tab. 31 společně se spotřebou ZP plynu pro každou variantu a výkonovým nárůstem v produkci EE.

Tab. 31: Navýšení výkonu kogenerace pro zajištění soběstačnosti tepelné energie

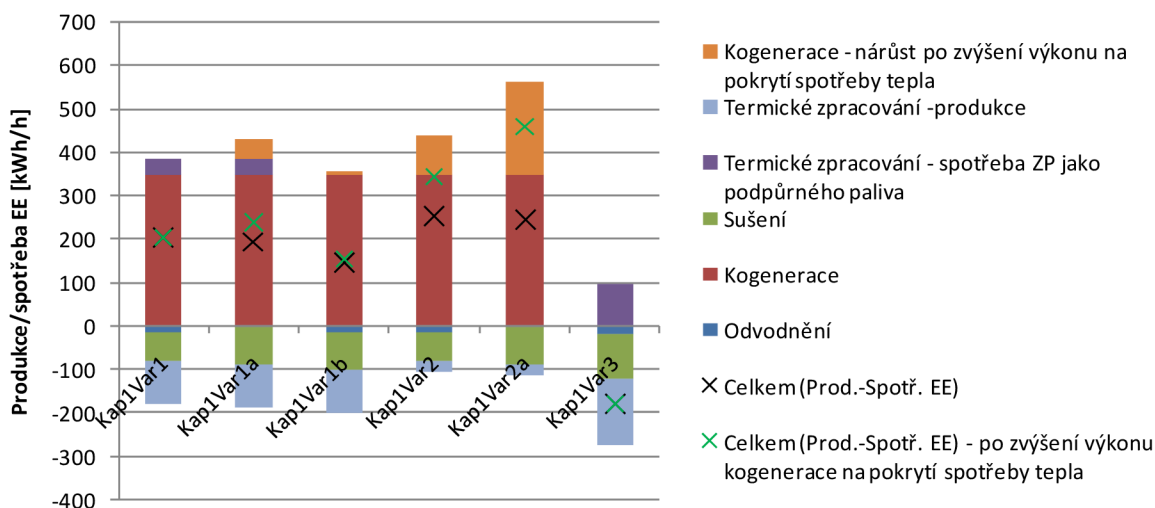
	Jednotka	Kap1Var1a	Kap1Var1b	Kap1Var2	Kap1Var2a
Chybějící tep. výkon	[MJ/h]	-256	-51	-507	-1198
Chybějící tep. výkon	[MJ/t suš. SSK]	-615	-122	-1216	-2876
Potřebný TE výkon kogenerace	[MJ/h]	2190	1985	2440	3132
Spotřeba ZP	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	14,5	2,9	28,6	67,6
Nová produkce EE	[kWh/h]	393	356	438	562
Nárůst produkce EE	[kWh/h]	46	9	91	215
Procentuální nárůst výkonu	[%]	13,3	2,6	26,2	62,0

Na obr. 43 jsou znázorněny výkonové bilance po započtení zvýšeného výkonu kogenerační jednotky.



Obr. 43: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby tepelné energie menších kapacit po zajištění soběstačnosti ve spotřebě tepelné energie

Při porovnání variant z hlediska bilance elektrické energie (obr. 44) se ukazuje výhoda výroby elektrické energie v kogeneračních jednotkách, kde je dosahováno vyšší účinnosti, než je tomu u monospaloven kalů. Důležité je i porovnání při použití zařízení k odvodnění kalů. Užitím šnekových lisů je dosažen výstupní obsah sušiny 25 % oproti použití odstředivek, kde je dosaženo 30 % sušiny. Uspořená spotřeba elektrické energie při odvodňování nepokryje zvýšenou spotřebu v nízkoteplotní sušárně na odpaření většího množství vody.



Obr. 44: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby elektrické energie menších kapacit

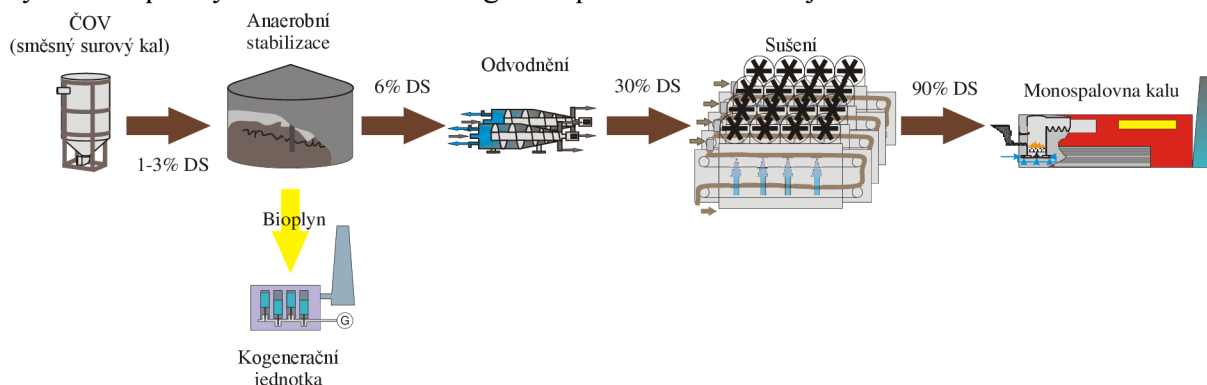
### 9.3. Kapacitní řešení 2: Kapacita pro lokality cca 1 mil. EO

#### 9.3.1. Varianta 1: Anaerobní stabilizace a spalování anaerobně stabilizovaného kalu (MAS, KGJ, CEN, DRYER, MINC)

Diskutovaná varianta je z technologického hlediska shodná s variantou 1 kapacity 100 tis. EO a skládá se z mezofilní anaerobní stabilizace, kogenerační jednotky využívající produkovaný bioplyn, odstředivky, soustavy nízkoteplotních sušáren a monospalovny kalu.

Z anaerobní stabilizace je produkovaný bioplyn odváděn a jímán v plynovém zásobníku. Jímaný plyn je následně využíván v kogeneračních jednotkách pro výrobu elektrické energie a tepla. Anaerobně stabilizovaný kal o sušině okolo 3–6 % prochází přes macerátor (případně drtič) a je čerpán na pár odstředivek. Z odstředivek odvodněný kal vypadává o 30% sušině do bunkru na odvodněný kal. Z bunkru je kal čerpán do distributorů sušáren a dávkován na sušící pás. Vysušený kal (obsah sušiny v rozmezí 60–90 %) je ze sušárny vynášen šnekovými dopravníky a pomocí pneumatické dopravy „foukán“ do sila na sušený kal. Ze sila, které zároveň slouží pro vyrovnávání nerovnoměrností v produkci sušeného kalu a kalu který je dále zpracováván, je kal dopravován do násypky rotační spalovací komory v zařízení pro monospalování kalu. Zde je kal spalován při teplotě 870 °C. Popel ze spalování kalu je přes mokrý výpad vynášen do kontejneru a vyvážen na skládku nebo případně do dalšího zařízení, kde bude docházet k získávání fosforu z popela. Spaliny

z dohořivací komory jsou vedeny přes kotel na odpadní teplo, ve kterém jsou ochlazovány na teplotu 240 °C a využívány pro výrobu páry, do systému čištění spalin. Produkovaná pára je využívána pro výrobu elektrické energie a tepla. Tato varianta je znázorněna na obr. 45.

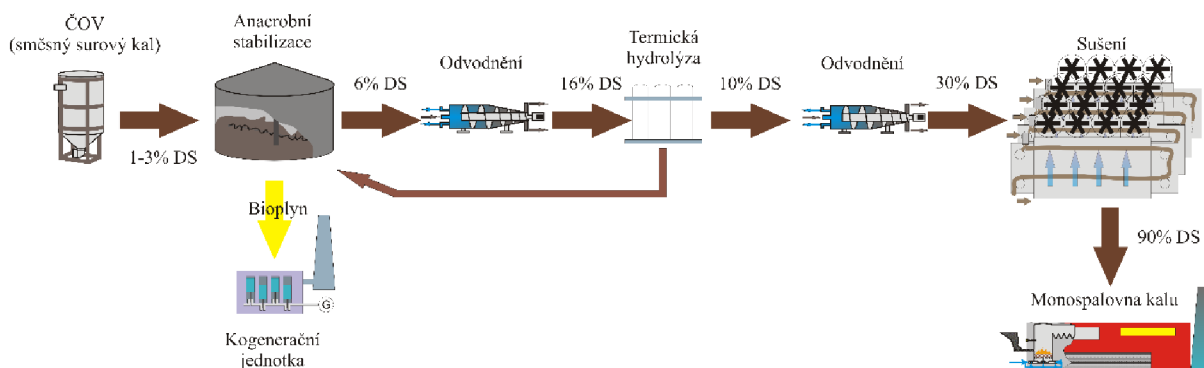


Obr. 45: Schéma varianty 1 složené z anaerobní stabilizace, odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování

### 9.3.2. Varianta 2: Anaerobní stabilizace s termickou hydrolýzou a monospalováním kalu (TAS, KGJ, CEN, TH, HCEN, DRYER, MINC)

Jedná se o variantu s termickou hydrolýzou anaerobně stabilizovaného kalu a termofilní anaerobní stabilizací. Tato varianta byla do porovnání zařazena, protože termická hydrolýza se stává velmi rozšířeným řešením a uvažuje se s ní i u nově budovaných případně rekonstruovaných kalových koncovek na kapacitně významných ústředních čistírnách odpadních vod (např. Praha, Brno, Bratislava a Vídeň). Proces termické hydrolýzy je podrobněji popsán v kap. 4.5. Směsný surový kal je čerpán do vyhnívacích nádrží, kde je míchán s centrátém z odvodnění za termickou hydrolýzou, a využíván k produkci bioplynu. Bioplyn je spalován v kogenerační jednotce a využíván pro výrobu elektrické energie a odpadního tepla. V této variantě jsou využívány 2 tepelné potenciály odpadního tepla. Vysokoteplotní odpadní teplo z dochlazování spalin, které je primárně použito jako zdroj tepelné energie pro proces termické hydrolýzy, a nízkoteplotní z dochlazování provozních kapalin a chlazení motoru využívané pro vytápění vyhnívacích nádrží a nízkoteplotní sušárny kalu.

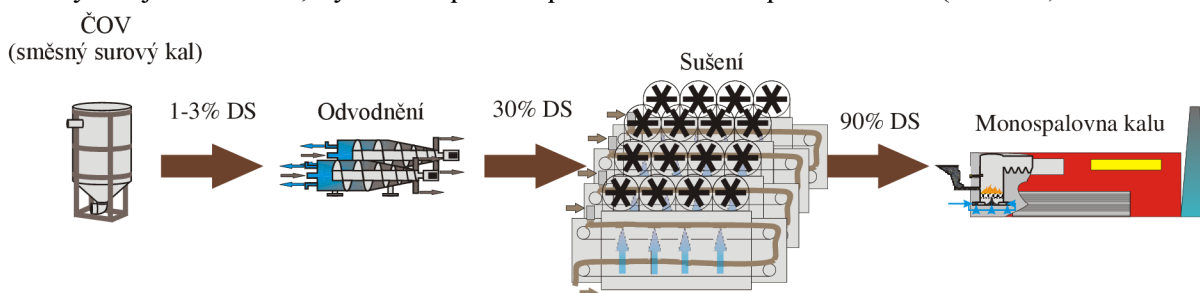
Anaerobně stabilizovaný kal z vyhnívacích nádrží je čerpán do odvodňovací odstředivky, která sníží množství vody v anaerobně stabilizovaném kalu. Zvýšení koncentrace sušiny v kalu a tím dosažené snížení množství kalu je důležité pro snížení energetické náročnosti a kapacity termické hydrolýzy. Na výstupu z termické hydrolýzy je kal znovu odvodňován na odstředivce a centrát je vrácen zpět do vyhnívacích nádrží. Odvodněný kal padá do skladového bunkru odvodněného kalu. Od této fáze je varianta shodná s var. 1 (čerpání odvodněného kalu do nízkoteplotní sušárny kalu a spalování kalu v zařízení na monospalování kalu). Celé blokové schéma je na obr. 46.



Obr. 46: Schéma varianty 2 složené z anaerobní stabilizace, předodvodnění, termické hydrolyzázy, odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování

### 9.3.3. Varianta 3: Přímé spalování směšného surového (CEN, DRYER, MINC)

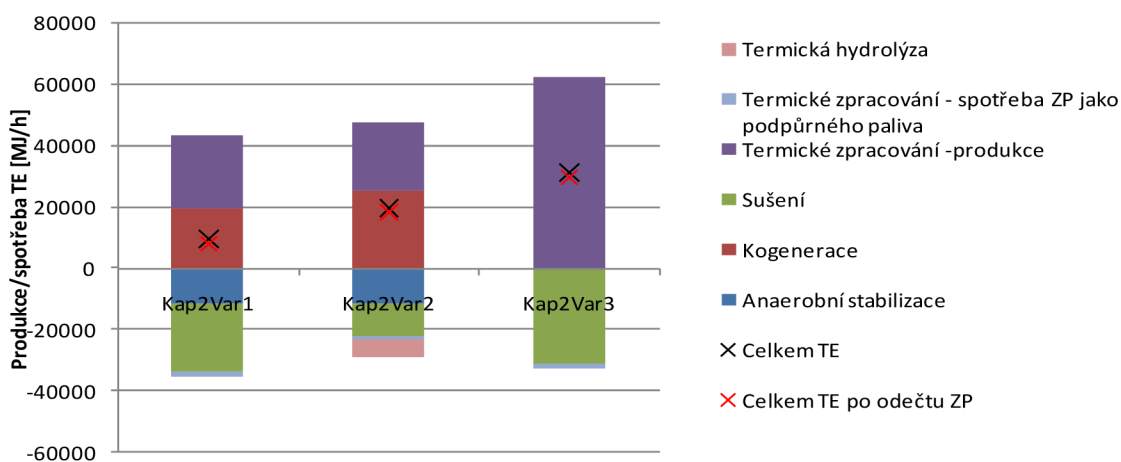
Jedná se o shodné řešení s variantou 3 kapacitního řešení pro 100 tis. EO. Směsný surový kal je odvodněn, vysušen a přímo spalován v monospalovně kalu (obr. 47).



Obr. 47: Schéma varianty 3 složené z odvodnění, nízkoteplotního sušení a spalování

## 9.4. Porovnání variant kapacitního řešení 2

Názorné porovnání tepelné bilance pro jednotlivé varianty je uvedeno na grafu v obr. 48. Tento graf vychází z energetických toků, jejichž souhrn je uveden v tab. 32.



Obr. 48: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby tepelné energie větších kapacit

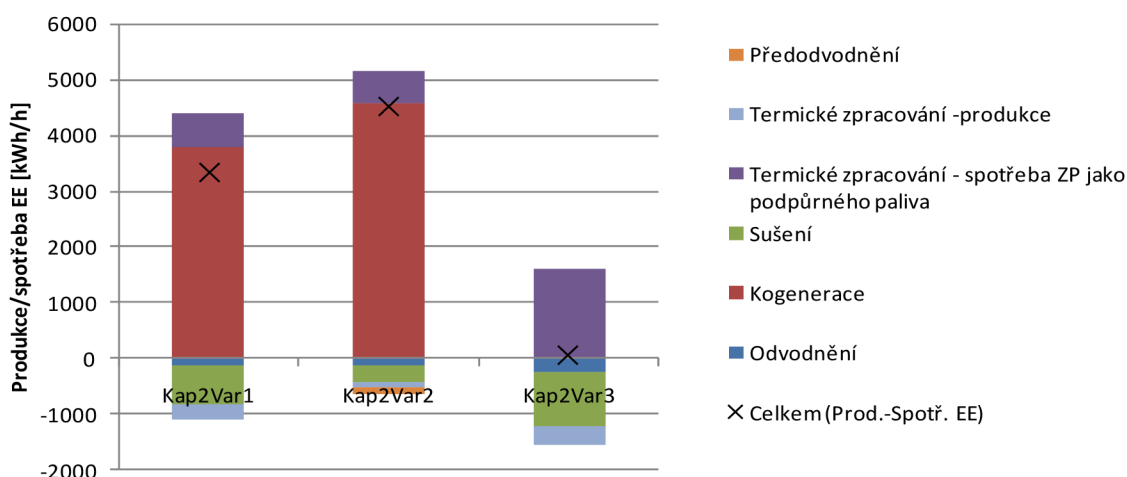
U vyšších kapacit nenastává problém s nedostatkem tepelné energie, a to díky vyšší účinnosti zařízení na monospalování kalu. Zároveň se projevuje výhodnost použití termické hydrolýzy. Na vstupu do monospalovny kalu je sice kal o nižším kalorickém obsahu (v tomto případě se dá očekávat nutnost použití dodatečného paliva) a v nižším množství než v případě klasické anaerobní stabilizace bez termické hydrolýzy (varianta Kap2Var1), avšak vyšší produkce bioplynu a zároveň nižší množství kalu o vyšším procentu sušiny na vstupu do nízkoteplotní sušárny znamená výrazné energetické úspory.

*Tab. 32: Spotřeby a produkce tepelné energie v jednotlivých procesech kalové koncovky větších kapacit*

Proces	Veličina	Varianta	Kap2Var1	Kap2Var2	Kap2Var3
Anaerobní stabilizace	Spotřeba TE	[MJ/h]	11667	11667	-
Kogenerace	Produkce EE	[kWh/h]	3775	4576	-
	Produkce TE	[MJ/h]	19416	25523	-
Předodvodnění	Spotřeba EE	[kWh/h]	-	120	-
Termická hydrolýza	Spotřeba tepla	[MJ/h]	-	5833	-
Odvodnění	Spotřeba EE	[kWh/h]	120	120	240
Sušení	Spotřeba EE	[kWh/h]	689	310	966
	Spotřeba TE	[MJ/h]	22341	10494	31312
Termické zpracování	Spotřeba EE	[kWh/h]	272	100	350
	Spotřeba ZP	[m <sup>3</sup> /h]	62	62	82
	Produkce EE	[kWh/h]	631	583	1609
	Produkce TE	[MJ/h]	24192	22241	62507
Celkem EE		[kWh/h]	3326	4509	53
Celkem TE		[MJ/h]	9600	19770	31195
Celkem TE po odečtu ZP		[MJ/h]	8240	18410	29396

Bilance produkce/spotřeby elektrické energie potvrzuje výhodnost použití anaerobní stabilizace s využitím produkovaného bioplynu v kogeneračních jednotkách a nízkou účinností monospalovny kalu s točivou redukcí (varianta Kap2Var3), kde produkce elektřiny je prakticky na úrovni soběstačnosti a nedá se proto očekávat zásobování dalších zařízení v areálu elektrickou energií.





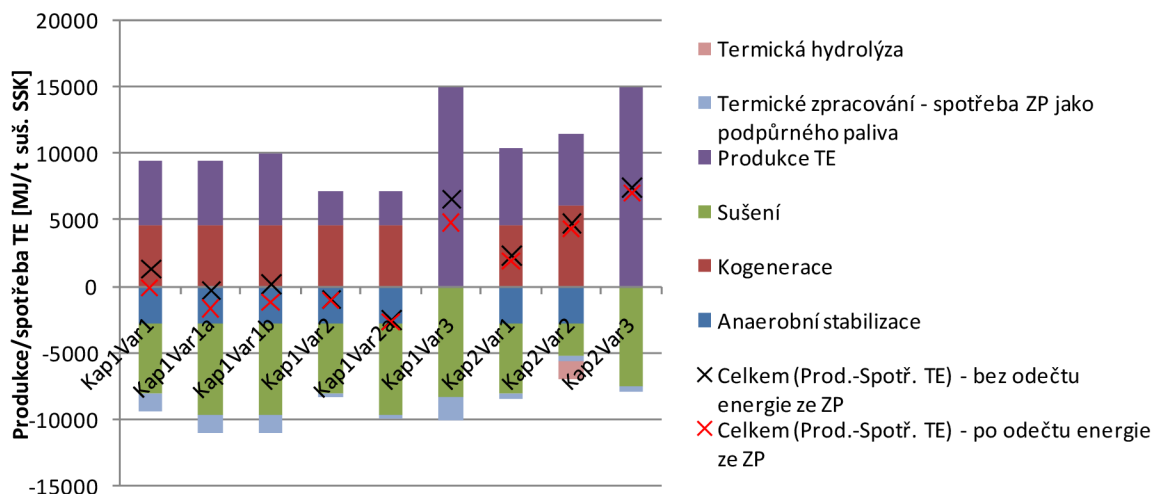
Obr. 49: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby elektrické energie větších kapacit

## 9.5. Celkové porovnání obou kapacitních variant

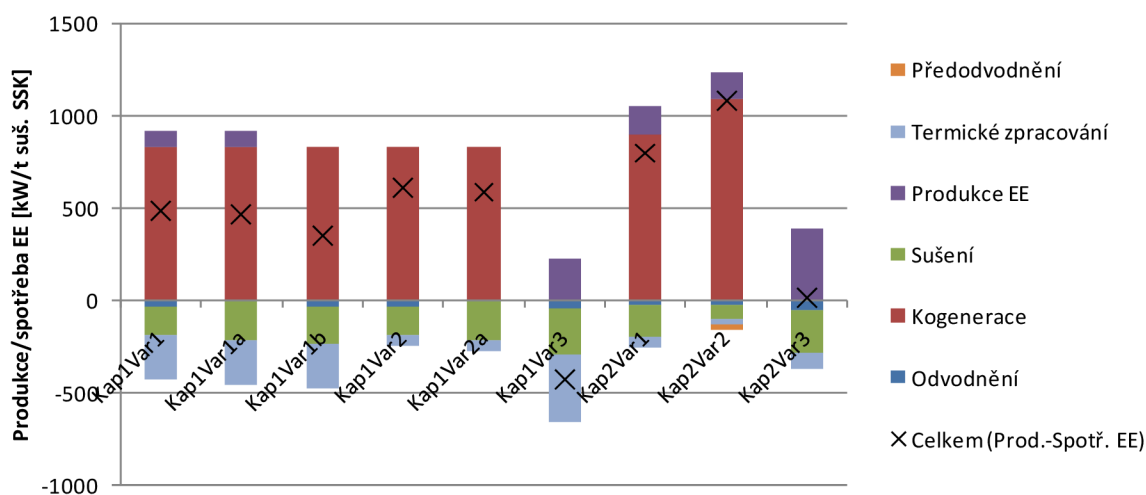
Pro možnost společného porovnání variant obou kapacit byly veškeré energetické toky přepočítány na 1t sušiny směšného surového kalu na vstupu. Přepočítané hodnoty udává tab. 33, z hlediska tepelné energie jsou zobrazeny na obr. 50, z pohledu elektrické energie na obr. 51.

Tab. 33: Spotřeby a produkce energií v jednotlivých procesech kalové koncovky na 1 t sušiny směšného surového kalu

Proces	Veličina	Jednotka	Kap1 Var1	Kap1 Var1 a	Kap1 Var1 b	Kap1 Var2	Kap1 Var2 a	Kap1 Var3	Kap2 Var1	Kap2 Var2	Kap4 Var3
Anaerobní stabilizace	Spotřeba TE	[MJ/h]	2800	2800	2800	2800	2800	0	2800	2800	0
Kogenerace	Produkce EE	[kWh/h]	832	832	832	832	832	0	906	1098	0
	Produkce TE	[MJ/h]	4641	4641	4641	4641	4641	0	4660	6125	0
Předodvodnění	Spotřeba EE	[kWh/h]	0	0	0	0	0	0	0	29	0
Termická hydrolyza	Spotřeba TE	[MJ/h]	0	0	0	0	0	0	0	1400	0
Odvodnění	Spotřeba EE	[kWh/h]	34	10	34	34	10	48	29	29	58
Sušení	Spotřeba EE	[kWh/h]	160	208	208	160	208	251	165	74	232
	Spotřeba TE	[MJ/h]	5360	6942	6942	5360	6942	8430	5362	2519	7515
Termické zpracování	Spotřeba EE	[kWh/h]	240	240	240	58	58	360	65	24	84
	Spotřeba ZP	[m <sup>3</sup> /h]	62	62	62	10	10	79	15	15	20
	Produkce EE	[kWh/h]	89	89	0	0	0	228	151	140	386
	Produkce TE	[MJ/h]	4832	4832	5326	2571	2571	14999	5806	5338	15002
Celkem EE		[kWh/h]	487	463	351	610	586	-431	798	1082	13
Celkem TE		[MJ/h]	1314	-268	225	-948	-2529	6569	2304	4745	7487
Celkem TE po odečtu ZP		[MJ/h]	-45	-1626	-1133	-1053	-2634	4832	1978	4418	7055



Obr. 50: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby tepelné energie na 1 t sušiny směsného surového kalu



Obr. 51: Porovnání jednotlivých variant z hlediska produkce a spotřeby elektrické energie na 1 t sušiny směsného surového kalu

Z porovnání těchto výsledků je patrné, že v případě kapacitně větších zařízení je energetický potenciál využit efektivněji s vyšší účinností. Z hlediska tepelné energie vychází nejefektivněji varianty přímého spalování směsného surového kalu. Významnou nevýhodou řešení spalování směsného surového kalu je nutnost výstavby monospalovny kalu přímo v areálu ČOV. To je způsobeno tím, že se pracuje s nestabilizovaným kalem, a je nutné jeho okamžité zpracování, aby nedocházelo k samovolným biologickým procesům. Další nevýhodou je produkce primárně tepla, které je problematické uplatnit, pokud není v blízkosti zařízení tepelná síť, kde by docházelo k jeho využití. Z těchto důvodů je mnohem výhodnější produkovat větší množství elektrické energie (i s rizikem nižší účinnosti), protože přebytek lze obvykle prodat do distribuční sítě. S ohledem na zde uvedené je mnohem výhodnější



využít variantu s anaerobní stabilizací s produkcí bioplynu a jeho využitím v kogeneračních jednotkách pro výrobu elektrické a tepelné energie.

## 9.6. Kritérium porovnání variant z hlediska účinnosti produkce energií

Aby bylo možné porovnat jednotlivé varianty z hlediska celkové produkce energií, bylo zvoleno kritérium, které vychází z kritéria R1 [92] pro hodnocení spaloven komunálních odpadů a vhodnosti jejich zařazení do kategorie zařízení na energetické využití odpadů. Úprava a aplikace kritéria na celou technologii linky kalové koncovky slouží pouze pro porovnání technologických variant v rámci této práce.

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (68)$$

Význam parametrů Energy efficiency R1 pro tuto práci:

- $E_p$  – Veškerá produkovaná energie (nezahrnuje nevyužitou energii, která je v rámci technologické linky mařena). Veškerá produkovaná energie bude reflektovat korekční faktory, které kompenzují účinnosti výroby energií v ostatních zařízeních využívajících primární zdroje, např. uhelných elektrárnách. Tato úvaha je původní myšlenkou alternativně užívaných kritérií. To znamená, že je pro výrobu energie použito odpadů, případně kalů, uspoří se primární zdroje energie, které jsou takto nahrazeny, a tím je přepočítáno na uspořené primární zdroje energie. Pro elektrickou energii je korekční faktor 2,6. Hodnota vychází z běžné účinnosti výroby elektrické energie, která činí 38 %  $\left(\frac{1}{0,38} = 2,6\right)$ . Pro výrobu tepelné energie je korekční faktor 1,1 vycházející z průměrné účinnosti výroby tepelné energie 90 %  $\left(\frac{1}{0,9} = 1,1\right)$ .
- $E_f$  – Externí dodávka energie do technologie. Převážně je uvažováno se spotřebou zemního plynu pro start a stabilizaci v termickém procesu. U technologií s nedostatkem tepelné energie bude navíc zahrnuto množství na zvýšení výkonu kogenerace.
- $E_i$  – Externí dodávka elektrické energie. Tento parametr bude významný pouze u varianty se spalováním směsného surového kalu, kde proces není soběstačný a je nutné ho dotovat elektrickou energií ze sítě.
- $E_w$  – Hodnota kalorického obsahu sušiny směsného surového kalu na vstupu do technologie kalové koncovky.

Souhrn hodnot parametrů pro jednotlivé technologie je uveden v tab. 34. Za účelem porovnání technologií je zaveden předpoklad využití veškeré produkované energie.

Tab. 34: Hodnoty kritéria Energy efficiency (R1) a dílčích parametrů

Veličina	Jednotka	Kap1 Var1	Kap1 Var1a	Kap1 Var1b	Kap1 Var2	Kap1 Var2a	Kap1 Var3	Kap2 Var1	Kap2 Var2	Kap2 Var3
Ew	[MJ/tsuš.SSK]	15812	15812	15812	15812	15812	15812	15812	15812	15812
Ep	[MJ/tsuš.SSK]	6007	5751	3868	8043	10692	7226	10005	15349	8269
Ef	[MJ/tsuš.SSK]	1358	2119	1509	1610	3665	1737	326	326	432
Ei	[MJ/tsuš.SSK]	0	0	0	0	0	4038	0	0	0
Účinnost výroby (R1)		0,28	0,21	0,14	0,38	0,37	0,09	0,62	0,96	0,50

Z porovnání výsledných hodnot účinnosti výroby energií je patrná vyšší účinnost u větších kapacit. Varianta s anaerobní stabilizací a využíváním bioplynu v kogeneračních jednotkách (varianta Kap2Var1) vychází i přes složitější technologické řešení výhodněji ve srovnání s variantou přímého spalování směsného surového kalu (varianta Kap2Var1). Nejvýhodněji vychází kalová koncovka využívající termickou hydrolýzu. Vzhledem k tomu, že proces termické hydrolýzy je další proces spotřebovávající tepelnou energii, je jeho přínos ve zvýšené produkci bioplynu (vyšší produkce elektrické energie a tepla), lepší odvoditelnosti vyhnílého kalu a menšího množství sušiny. Tyto atributy výrazně snižují potřebnou kapacitu nízkoteplotní sušárny kalu a její nárok na dodávku tepla.

Přestože tato varianta vycházela z obecných dat udávaných výrobcí a úpravou bilančních výpočtů pro standardní anaerobní stabilizaci, je její potenciál značný. Bylo by vhodné v dalších pracích provést detailnější výpočet se zahrnutím skutečných měření z již stávajících realizací.

Z kapacitně menších zařízení vycházejí výhodně obě varianty s pyrolýzní jednotkou. Zde se výhodně projevuje kompaktní provedení pyrolýzní jednotky s nízkými požadavky na spotřebu elektrické energie a na spotřebu podpůrného paliva. Oproti monospalovně kalu je zařízení pyrolýzní jednotky jednodušší, nevyžaduje další příslušenství včetně parního okruhu, úpravy kotelní vody, kotle (případně turbíny). Množství čištěných spalin je také nižší u pyrolýzní jednotky, protože není spalován přímo vysušený anaerobně stabilizovaný kal, ale pouze produkovaný pyrolýzní plyn s nižším přebytkem spalovacího vzduchu. Dalším důvodem nižší produkce spalin je neúplná oxidace veškerého uhlíku v palivu, přičemž dle chemických rozborů zůstává v sušině tuhého zbytku 26 % spalitelných látek (Kap. 6.2 ohledně popisu pyrolýzní jednotky).

## 10. Návrh technologické linky pro zpracování kalů kapacity 100 tis. EO

Zařízení technologické linky na zpracování anaerobně stabilizovaného kalu z menších kapacit ČOV lze rozdělit do provozních souborů (PS01 a PS02). Provozní soubor PS01 zahrnuje předúpravu kalu před jeho termickým zpracováním, provozním souborem PS02. V rámci této práce bylo vytvořeno technologické schéma celé linky ve složení z odvodnění pomocí šroubového lisu, vysušení nízkoteplotní pásovou sušárnou a termický stupeň složený ze dvou paralelních pyrolýzních jednotek. Vytvořené technologické schéma je v příloze 10.

### 10.1. PS01 Odvodnění a sušení kalu

Provozní soubor PS01 se skládá z technologie odvodnění pomocí šroubového lisu (SC107) včetně nezbytného příslušenství flokulační stanice (PU103) a čerpadla kalu (P106). Výpad odvodněného kalu ze šroubového lisu je umístěn přímo do bunkru na odvodněný kal (B111).

Z bunkru je kal vyprazdňován kalovým čerpadlem (FP112) a čerpán do distributoru pásové sušárny (D113). Distributor slouží k rovnoměrnému vrstvení kalu na vrchní pás v sušárně (D124). Na přechodu mezi horním pásem (HB114) a spodním pásem (LB115) je umístěn drtič (D116), který má za úkol lámat nadměrně velké části. Na konci spodního pásu je násypka a vynášecí šnek (C119) suchého kalu ze sušárny. Výstup šnekového dopravníku je opatřen turniketovým uzávěrem pro zamezení přisávání vzduchu do sušárny. Sušený kal je pomocí vzduchem chlazeného dopravníku (HE120) veden do drtiče (D122) pro snížení granulometrie kalu, která je výhodnější z hlediska pneumatické dopravy (D123). Drtič je od násypky pneumatické dopravy oddělen turniketovým uzávěrem (TR121).

Čerstvý vzduch do sušárny je nasáván pomocí ventilátoru (B131) z několika míst, z prostoru haly sušárny, z prostoru bunkru a z vnějšku budovy. Význam možnosti přisávání jak z vnitřního prostoru haly, tak z vnějšího okolí byl popsán v kap. 5.2.1. Nasávání z prostoru bunkru slouží k vytvoření podtlaku a minimalizaci šíření zápachu. Čerstvý vzduch prochází přes rekuperační výměník (HE125), kde je předeříván odpadním vzduchem ze sušárny, a je mísen se vzduchem uvnitř sušárny. Proudění vzduchu uvnitř sušárny zajišťují ventilátory (B117). Odpadní vzduch za rekuperačním výměníkem je upravován pomocí dvoustupňového chemického čištění v chemické pračce plynů (CH126). Upravený odpadní vzduch z chemického čištění je odsáván ventilátorem (B132) a vyfukován přes biofiltr (B133) do ovzduší.

Sušený kal je skladován v tepelně izolovaném silu (S136) pod ochranou atmosférou dusíku. Dusík je do sila doplňován z tlakových lahví umístěných na stanovišti pro lahve se stlačeným dusíkem (NI138). Do sila je dusík pouštěn přes rozdělovací šnekový dopravník (C137). Rozdělovací šnekový dopravník slouží pro rozdělení výstupu ze sila na

plnění a odvoz usušeného kalu pomocí automobilové dopravy a nebo k rozdělení do paralelních pyrolýzních jednotek. Aby se snížila spotřeba dusíku pro inertizaci, jsou sila opatřena na vstupu tkaninovým filtrem (F135) a turniketovým uzávěrem (TR140A) pro separaci kalu a transportního vzduchu.

## 10.2. PS02 Spalovací zařízení a utilizace tepla

Vstupním zařízením termického stupně jsou vyrovnávací bunkry (B208A a B208C) sloužící pro vyrovnání nerovnoměrných dodávek suchého kalu ze skladovacích sil. Kal je z bunkrů rovnoměrně dávkován do pyrolýzních reaktorů (RE205) pomocí šnekových dopravníků (C207) a turniketových rotačních uzávěrů (TR206).

V reaktoru dochází k pyrolýznímu procesu sušeného kalu a k oddělení tuhého zbytku (karbonizovaného kalu) a produkovaného pyrolýzního plynu. K ohřevu reaktorů se využívá měrné teplo spalin ze spalování pyrolýzního plynu, nebo při startu pyrolýzní jednotky zemního plynu, ve spalovací komoře (CH201A a CH201C). Pyrolýzní plyn je před vstupem do hořáků čištěn od prachových částic pomocí cyklonového odlučovače (CY203A a CY203C). Tuhé zbytky z cyklonového odlučovače a karbonizovaný kal je dopravován šnekovými dopravníky (C209A, C209C, C211A, C211C a C218) do rozdělovacího dopravníku (C219), který slouží pro rovnoměrné plnění kontejnerů umístěných na kontejnerovém stání (CO220)

Spaliny jsou za reaktorem dochlazeny pomocí výměníku (HE212A a HE212B), kde je energetický potenciál využit k produkci horké vody o teplotě 90°C pro vytápění sušáren kalu. Součástí okruhu horké vody je bezpečnostní vzduchový chladič (CO228) sloužící pro bezpečný provoz v případě výpadku spotřeby tepla, nebo snížení výkonu sušáren. Spaliny poté prochází dvoustupňovým čištěním, zásaditým mokřím čištěním v pračce plynů (SC221A a SC221C) pomocí roztoku NaOH a následně v katalyzátoru s náplní z aktivního uhlí (AC223A a AC223C). Spaliny jsou odsávány spalinovým ventilátorem (B225A a B225C) přes emisní měření do komína (B226A a B226C).

## 11. Návrh technologické linky pro zpracování kalů kapacity 1 mil. EO

Zařízení technologické linky na zpracování anaerobně stabilizovaného kalu z ČOV lze rozdělit do několika na sebe navazujících provozních souborů (PS01 – PS09). Provozní soubor PS01 zahrnuje předúpravu kalu před jeho termickým zpracováním, jehož součástí jsou rozděleny ve zbylých provozních souborech. PS02 zahrnuje spalovací zařízení a utilizace tepla, PS03 paro-vodní hospodářství, PS04 chladicí okruh, PS05 čištění spalin, PS06 pomocné provozy nezbytné pro činnost systému čištění spalin, PS07 emisní monitoring a komín, PS08 stanice stlačeného vzduchu a PS09 výměňkovou stanice pro produkci teplé vody využívané pro vytápění sušárny kalu a přebytky tepla CZT nebo ostatní provozy v areálu zařízení. V rámci této práce bylo vytvořeno technologické schéma celé linky ve spolupráci se souběžně zpracovávanými disertačními pracemi [94] a [97], kde je dále rozpracována možnost začlenění zařízení pro termické zpracování čistírenských kalů v součinnosti a optimalizaci využití odpadního tepla se zařízením na energetické využití odpadů. Vytvořené technologické schéma je v příloze 11. Technologické schéma bylo zpracováno na základě bilančního modelu vytvořeném pomocí softwaru W2E doplněném o model nízkoteplotní sušárny kalu. Pro provozní soubor PS01 byl vytvořen rozměrový výkres, který je součástí přílohy 12.

### 11.1. PS01 Odvodnění a sušení kalu

Provozní soubor PS01 se skládá ze 2 paralelních linek technologie odvodnění pomocí odstředivek (CU107A, CU107C) včetně nezbytného příslušenství flokulační stanice (PU103A, PU103C) a čerpadla kalu (P106A, P106C) v uspořádání 1+1, kdy je možno provozovat obě odvodňovací linky nezávisle na sobě. Výpad odvodněného kalu z obou odstředivek je umístěn do sestavy dopravníků (C108A, C109A, C108C, C109C), pomocí kterých je rozdělen do dvou kalových bunkrů na odvodněný kal (B111A, B111C). Každý z bunkrů slouží pro jeden pár nízkoteplotních pásových sušáren.

Funkce a složení zařízení nízkoteplotní pásové sušárny je shodné s variantou nižších kapacit a bylo popsáno v (kap. 10.1) pouze s tím rozdílem, že bude použito 4 paralelních linek o větší kapacitě. Z bunkrů je kal vyprazdňován kalovými čerpadly (FP112A, FP112B, FP112C, FP112D) a čerpán do distributorů pásových sušáren (D113A, D113B, D113C, D113D). Distributory slouží k rovnoměrnému vrstvení kalu na vrchní pásy v sušárnách (D124A, D124B, D124C, D124D). Na přechodu mezi horními pásy (HB114A, HB114B, HB114C, HB114D) a spodními pásy (LB115A, LB115B, LB115C, LB115D) jsou umístěny drtiče (D116A, D116B, D116C, D116D), který mají za úkol lámat nadměrně velké části. Na konci spodních pásů jsou násypky a vynášecí šnekové dopravníky (C119A, C119B, C119C, C119D) suchého kalu ze sušáren. Výstupy šnekových dopravníků jsou opatřeny

turniketovými uzávěry pro zamezení přísávání vzduchu do sušáren. Sušený kal je pomocí vzduchem chlazených dopravníků (HE120A, HE120B, HE120C, HE120D) vedeny do drtičů (D122A, D122B, D122C, D122D) pro snížení granulometrie kalu, která je výhodnější z hlediska pneumatické dopravy (D123A, D123B, D123C, D123D). Drtiče jsou od násypky pneumatické dopravy odděleny turniketovými uzávěry (TR121A, TR121B, TR121C, TR121D).

Čerstvý vzduch do sušáren je nasáván pomocí ventilátorů (B131A, B131B, B131C, B131D) z několika míst, z prostoru haly sušáren, z prostoru bunkrů a z vnějšku budov. Význam možnosti přísávání jak z vnitřních prostor hal, tak z vnějšího okolí byl popsán v kap. 5.2.1. Nasávání z prostoru bunkrů slouží k vytvoření podtlaku a minimalizaci šíření zápachu. Čerstvý vzduch prochází přes rekuperační výměníky (HE125A, HE125B, HE125C, HE125D), kde je předehříván odpadním vzduchem ze sušáren, a je mísen se vzduchem uvnitř sušáren. Proudění vzduchu uvnitř sušáren zajišťují ventilátory (B117A, B117B, B117C, B117D). Odpadní vzduch za rekuperačními výměníky je upravován pomocí dvoustupňového chemického čištění v chemických pračkách plynů (CH126A, CH126B, CH126C, CH126D). Upravený odpadní vzduch z chemického čištění je odsáván ventilátory (B132A, B132B, B132C, B132D) a vyfukován přes biofiltry (B133A, B133B, B133C, B133D) do ovzduší.

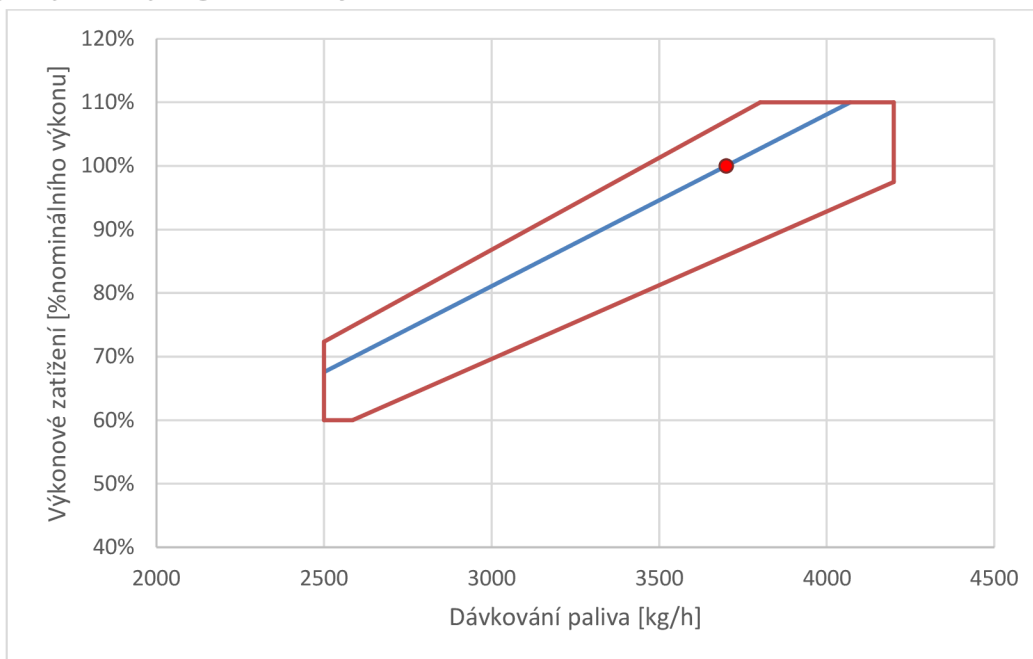
Sušený kal je skladován v tepelně izolovaných silech (S136A a S136C) pod ochranou atmosférou dusíku. Dusík je do sila doplňován, pomocí vyvíječů dusíku (NI138A a NI138C), přes rozdělovací šnekový dopravník (C137A a C137C). Rozdělovací šnekový dopravník slouží pro rozdělení výstupu ze sila na plnění a odvoz usušeného kalu pomocí automobilové dopravy a nebo k dalšímu zpracování v termickém stupni. Aby se snížila spotřeba dusíku pro inertizaci, jsou sila opatřena na vstupu tkaninovým filtrem (F135A a F135C) a turniketovým uzávěrem (TR140A a TR140C) pro separaci kalu a transportního vzduchu.

## 11.2. PS02 Spalování kalu

Vstup vysušeného kalu z distribučního šnekového dopravníku na výstupu ze sila je do násypky spalovacího zařízení (C208) veden pomocí dopravníku (BC207). Množství dávkovaného kalu do spalovacího zařízení je regulováno dopravníkem (C210), který je z bezpečnostních důvodů chlazen vodou.

Spalovací zařízení se skládá z rotační pece (RK211), dohořivací komory (CH212) a parního vodotrubného kotle. Horké spaliny vystupující z dohořivací komory o teplotě 870 °C a proudí do parního kotle. Ve vodotrubném parním kotli je vyráběna přehřátá pára o parametrech 1,4 MPa (abs.) a teplotě 230 °C za současného ochlazení spalin na teplotu okolo 240 °C. Spaliny jsou dále ochlazovány ve vymístěném ekonomizéru (HE310), který je umístěn za prvním stupněm čištění spalin, na teplotu 145 °C. Teplo odebrané spalinám je využito pro výrobu páry o tlaku 1,4 MPa (abs.) o teplotě 230 °C. Ta je používána k technologickým účelům v rámci zařízení na spalování kalů (ohřevy spalovacích a transportních vzduchů), generování elektrické energie a pro ohřev vody, která slouží k exportu tepelné energie pro sušárny kalu a přebytek do sítě CZT, případně okolních provozů.

Škvára na výstupu z rotační komory padá do odpopelňovacího zařízení (C224) a je beranovým vynašečem dopravována na pásový dopravník (C225) a následně na skládku škváry. Výkonový digram kotle je znázorněn na obr. 52.



Obr. 52: Výkonový digram kotle pro spalování anaerobně stabilizovaného kalu

V rámci návrhu je uvažováno s nominálním obsahem sušiny kalu 90 %, to odpovídá výhřevnosti kalu 9 MJ/kg, maximálním obsahem sušiny 95 % o výhřevnosti 9,6 MJ/kg a minimálním obsahem sušiny 80 % o výhřevnosti 7,7 MJ/kg. Termický výkon je regulován v rozsahu od 60 do 110 % (přetížení) a zpracovatelský výkon od 2500 kg/h do 4200 kg/h.

### 11.2.1. Spalovací komora

Spalovací komora RK211 je tvořena ocelovým pláštěm a vnitřní vyzdívkou. Pro návrh rozměrů rotační komory bylo zvoleno z dat uvedených v tab. 35 [94] výkonové zatížení okolo 125 kW/m<sup>3</sup> a délka rotační komory 10 m. Pro tyto parametry vychází vnitřní průměr rotační komory 3,2 m. Čelo rotační pece z přední strany nese dávkovací zařízení, umožňuje vstup spalovacímu vzduchu a výkonový hořák (B228) sloužící pro najetí pece, tj. vyhřátí na požadovanou teplotu, a ke stabilizaci procesu hoření v peci např. při poklesu výhřevnosti. Hořák se skládá z hlavní výkonové trysky a stabilizační trysky. Za normálního provozu není nutné výkonovou trysku využívat a je v provozu pouze stabilizační hořák. Se spalovací komorou je čelo spojeno přes lamelové ucpávky.

Pec je provozována tak, že spaliny na výstupu z pece mají teplotu okolo 850 °C. K zapálení kalu a udržování potřebné teplotní úrovně při případném poklesu výhřevnosti slouží výkonový hořák, který spaluje stabilizační palivo (zemní plyn).

Tab. 35: Příklady rozměrů rotačních pecí a výkonového zatížení [94]

Spalovna (Dodavatel spalovny)	ČKD-DIZ		DEZA PSP-VUCHZ	Cerekvice VUCHZ (RP SMS)	návrh Rzeszów (RP Trinom)
Termický výkon RP (MW)	4	9	7,5	0,73	1,22
Rozměry rot. pece					
vnitřní průměr (mm)	2100	3000	2400	1000	1500
délka (m)	10	12	14	6	6,8
celkový objem RP (m <sup>3</sup> )	34,6	84,8	63,3	4,71	12
užit. objem RP (m <sup>3</sup> )	31	72	-	-	-
Teplné zatížení RP (MW/m <sup>3</sup> )	0,129	0,125	0,118	0,156	0,102

Rotační pec je opatřena na obou stranách těsněním zabraňujícím přísávání vzduchu. Pracovní podtlak v peci se předpokládá -50 až -20 Pa oproti okolní atmosféře, aby se zabránilo nežádoucímu úniku spalin do haly. Horní část komory tvoří přechod pro vlastní dohořivací komoru.

### 11.2.2. Dohořivací komora

Dohořivací komora (CH212) navazující na spalovací komoru je osazena výkonovým hořákem (B229) zajišťujícím dohřání spalin na teplotu 870 °C za posledním přívodem spalovacího vzduchu a zdržení min. 2 s. Spaliny opouštějí prostor dohořivací komory vstupem do obratové komory. V havarijních případech, kdy hrozí nebezpečí poškození navazujících technologií (zejména parogenerátoru nebo z důvodu ztráty podtlaku ve spalovací komoře) je otevřen nouzový komín (ES213).

### 11.2.3. Parní kotel

Parní kotel je napojený na dohořivací komoru (CH212) a je tvořen svazky trubek umístěnými uvnitř ocelové konstrukce s vyzdívkou. Parní kotel je koncipována jako horizontální s vertikálně orientovanou vstupní obratovou komorou. Kotel je tvořen z obratové komory, přehříváku, výparníku, ekonomizérů a parního bubnu, které zajišťují předehřev vody, vyvíjení páry a její přehřívání:

Obratová komora (CH214) je částečně konstruována obdobně jako dohořivací komora, ale její větší část je tvořena membránovou stěnou, která slouží jako výparník parního kotle. Tato obratová komora slouží také jako gravitační usazovák uletujících částic z prostoru spalování. Usazované částice se shromažďují v dolní části obratové komory, odkud jsou vynášeny šnekovým dopravníkem (C220) do výpadu.

Na obratovou komoru ve směru toku spalin navazuje přehřívák páry (SH216), který je koncipován jako souprůdý a sestává ze svazku trubek, které jsou zaústěny do rozváděcího a sběrného potrubí. Do rozváděcího potrubí je napojeno potrubí syté páry z bubnu a na sběrné potrubí navazuje parovod. Teplota přehřáté vody je regulována vstříkem napájecí vody do vstříkovací komory v parovodu.



Vodotrubný výparník sestává ze 4 bloků pro lepší čistitelnosti ofukováním a snadnější kontrolu a je umístěn včetně komor také v horizontálním tahu kotle za přehřívákem. První dva bloky (VA217A) a (VA217B) jsou umístěny v samostatně přepravitelném bloku, tvořeném kanálem z membránových stěn z důvodu vysokých teplot spalin. Před oběma svazky výparníku jsou umístěny dva parní ofukovače nad sebou kvůli optimální čistitelnosti svislých svazků trubek. Další dva bloky (VA 218A a VA 218B) jsou v plechovém kanálu a tvoří též samostatně přepravitelný celek. Každý blok je tvořen svazkem svislých trubek, které jsou v řadách za sebou zaústěny do dolních a horních komor. Do dolní komory je přiváděna voda zavodňovacím potrubím, z horní komory je odváděna parovodní směs zpět do bubnu. Mezerami mezi dolními komorami propadá popílek do výsyvky.

Ekonomizér (HE310) tvoří dva svazky umístěné mimo kotel v samostatném plechovém kanálu ve tvaru U. Napájecí voda vstupuje napájecím potrubím do vstupní komory a proudí ohřívákem v protiproudu do výstupní komory.

Parní buben (BO219) je umístěn nad kotlem a je podepřen svislým zavodňovacím potrubím. Buben odděluje sytou páru z parovodní směsi, která proudí do bubnu z části výparníku, tj. z membránových stěn a čtyř bloků vodotrubného výparníku. Uvnitř bubnu je vestavba zabezpečující požadovanou kvalitu páry.

#### 11.2.4. Čištění teplosměnných ploch

K čištění teplosměnných ploch přehříváku (SH216) a bloků výparníků (VA217, VA218) ze strany spalin jsou použity parní ofukovače. Pára pro ofukování je odebírána z výstupního parovodu. Přehřívák páry a první svazek vodotrubného výparníku, které jsou v kontaktu se spalinami při vyšších teplotách, jsou čištěny dvěma výsuvnými ofukovači umístěnými před svazky přehříváku a výparníku. Ostatní bloky výparníku, umístěné v nižších teplotách spalin jsou čištěny trvale zabudovanými otočnými ofukovači.

#### 11.2.5. Odpopílkování kotle

Soubor odpopílkování zahrnuje odpopílkování kotle z výsyvky pod přehřívákem a pod bloky výparníku. Příčné šnekové dopravníky (C221)- z jednotlivých výsypek horizontálního tahu dopravují popílek přes turnikety (TR222) do sběrného podélného šneku (C223). Z něj padá popílek svislou svodkou k dolnímu podélnému dopravníku, do kterého je napojen vstup pneumatického dopravníku (E227) a jeho pomocí je popílek veden do skladovacího sila (S620) vybaveného filtrem (F621).

#### 11.2.6. Spalovací vzduch

Pro přídavné výkonové hořáky na zemní plyn je spalovací vzduch pro proces hoření dodáván radiálními ventilátory V230 a V231. Pro spalování kalu v rotační komoře jsou využívány ventilátory (V232 a V233). Množství spalovacího vzduchu je řízeno automaticky pomocí frekvenčního měniče motoru ventilátoru a regulačními klapkami. Vzduch je nasáván vzduchotechnickým potrubím rozveden k jednotlivým spotřebičům.

### 11.3. PS 03 Parovodní hospodářství

Koncepce vychází z Rankinova-Clausiova parního cyklu pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Napájecí voda (kondenzát) je ze sběrné nádrže (T301) pomocí čerpadel (P302A a P302B) dopravena do nádrže s termickým odplyněním (T303). Napájecí voda je do nádrže (T303) doplňována z potrubí pitné vody, která je zbavena nečistot ve filtru tuhých částic (F313) a upravena pomocí automatického změkčovače vody (K314). Z nádrže odplynění je voda čerpána čerpadly (P309A a P309B) do ekonomizéru (HE310) a předeřtá voda následně do boileru (BO219). Z boileru jsou napájeny vodou výparníky (VA217A, VA217B, VA218A a VA218B) a vyrobená pára se vede zpět do boileru. V boileru se separuje horká voda (v dolní části) a pára, která se odebírá do přehříváku (SH216) a dohřtá na požadovanou teplotu (230 °C a 1,4 MPa). Tato přehřtá pára je přiváděna do parní turbíny (T312), kde při expanzi na výstupní tlak (115 °C a 160 kPa) je generována elektrická energie. Z turbíny pak sytá pára proudí do výměníků tepla (kondenzátorů) (VT902A a VT902B), kde odevzdá teplo a dojde k její kondenzaci.

### 11.4. PS 04 Chladicí okruh

Pro zachování spolehlivého a bezpečného provozu zařízení je nezbytné, aby zařízení disponovalo systémem odvodu přebytečného tepla pro situace, kdy není dostatečná poptávka po tepelné energii. Z tohoto důvodu je navržen chladicí okruh, který odebírá teplo teplé vodě. Chladicí okruh se sestává zejména z deskového výměníku tepla (VT 401), vzduchových chladičů (mařičů tepla) (VM402), expanzní nádoby (EN403) a čerpadel (P404A a P404B), která udržují nemrznoucí teplotnosné medium v oběhu.

### 11.5. PS 05 Čištění spalin

Technologie čištění spalin je nezbytnou součástí zařízení pro termické zpracování čistírenských kalů. Prvním aparátem systému čištění spalin je kontaktor (CT503), kde dochází k reakci kyselých složek se sorbentem. Dalším zařízením je tkaninový filtr (FF505), kde dochází k separaci tuhých látek a sorbentu z proudu spalin. Odstraněné tuhé látky (popílek a adsorbent) propadají dvojklopkami do šnekových dopravníků, které je dopravují do ejektoru. Pro čištění tkaninových filtrů proti usazeným částicím je zavedeno jejich čištění pomocí pulzních tlakových trysek. Trasa spalin od spalovací komory CH212 až před komín ST702 je udržována v podtlaku pomocí ventilátorů (V513 a V527). Za ventilátorem je umístěn SCR Reaktor [95] (R519) a následně je dávkováno aktivní uhlí a druhý tkaninový filtr (FF522) pro odloučení tuhých částic a aktivního uhlí z proudu spalin. Celý systém čištění spalin je zakončen emisním monitoringem (EM701) a komínem (ST702).

## 11.6. PS 06 Pomocné provozy

Mezi pomocné provozy v rámci zařízení pro termické zpracování čistírenských kalů patří doprava a úprava jednotlivých provozních médií, zejména vody, sorbentů, čpavkové vody a popelovin. Čpavkové hospodářství spočívá především ve stáčení čpavkové vody do zásobní nádrže (T601), jeho dopravě, odpařování a dávkování do spalin. Technická soda ( $\text{NaHCO}_3$ ) je skladována v zásobníku sila (S605) a ze sila je šnekovým dopravníkem (C609) dávkována přes turniket (TR610) do mlýnu (M612), ze kterého je jemně mletá pneumaticky dopravována (V611) do místa dávkování sorbentu do spalin. Mletí sody navyšuje účinnost neutralizace kyselých látek zvyšováním aktivního povrchu dávkovaného množství, které tak snáze reaguje. Jako druhý sorbent je využíváno aktivního uhlí, které je skladováno a dopravováno do zařízení v tzv. Big bagů (S613). Z nich je dávkováno aktivního uhlí šnekovým dopravníkem (C616) do potrubí pneumatické dopravy (BL618), která sorbent přivádí do místa dávkování (I520).

V rámci popílkového hospodářství je zajišťována doprava, skladování a plnění nákladních vozidel pro odvoz popílku z tkaninových filtrů na skládku.

Popílek je zachycován v tkaninovém filtru (FF504) a v kotli na odpadní teplo. Z tkaninového filtru I. (FF504) je šnekovými dopravníky (C510) odvádí popílek do ejektoru pneumatické dopravy (BL511) popílku a je následně pneumaticky dopravován do zásobního sila popílku (S620). Podobně je zachycován popílek v kotli na odpadní teplo, kde je shromažďován dopravníky C223 a poté pneumatickou dopravou (BL226) foukán do zásobního sila popílku (S620).

## 11.7. PS07 Emisní monitoring a komín

System čišění spalin (PS05) je z hlediska proudu spalin zakončeno emisním monitoringem (EM701) a komínem (ST702). Emisní monitoring slouží ke kontrole účinnosti systému čišění spalin a kontrolu množství škodlivých látek vypouštěných do ovzduší.

## 11.8. PS 08 Kompresorovna

Kompresorovna slouží pro zásobování technologie stlačeným vzduchem. Stlačený vzduch je využíván hořáky, pro regeneraci filtrů na silech, pro provzdušňování výsypek sil, pro dávkování čpavkové vody, pro regeneraci tkaninových filtrů, pro emisní monitoring a pro ovládání pneumatických pohonů. Kompresorovna má 3 hlavní části, kompresor (BL801), vzdušník (T802) a sušičku tlakového vzduchu (HE803)

## 11.9. PS 09 Výměňíková stanice

Výměňíkovou stanicí tvoří soustava parovodních výměňíků, vodních kolektorů, distributorů, čerpadel, parních a vodních armatur. Účelem stanice je předávání tepla z

nízkotlaké a středotlaké páry do horkovodní distribuční sítě pro zásobování teplem sušárny a další provozy. Dvojice výměníků (VT902A a VT902B) zajišťují ohřev vody nízkotlakou sytou parou (115 °C, 160 kPa) až na teplotu 90 °C. Dvojice čerpadel (C901A a C901B) zajišťují cirkulaci vody.

## Závěr

V České republice se vyprodukuje zhruba 170 kt sušiny kalu za rok, z toho je přímo aplikováno na zemědělskou půdu cca 60 kt za rok. Kal obsahuje významné množství fosforu. Fosfor je důležitou součástí hnojiv a je nezbytný pro růst rostlin. Nicméně kal obsahuje celou řadu škodlivých látek (těžké kovy, mikropolutanty, patogenní organismy), které znemožňují jeho přímé využití na zemědělských půdách bez předešlé účinné hygienizace. Limity pro aplikaci kalů na zemědělskou půdu jsou neustále zpřísnovány a v některých západních zemích je jejich použití dokonce zakázané, případně je zavedena povinnost označování zemědělských produktů nabízených v obchodech tak, aby bylo patrné, že byly vypěstovány na polích, kde byl ke hnojení použit čistírenský kal. To má za následek sníženou poptávku po takto vypěstovaných a označených potravinách a nezáměrně obchodních řetězců zboží odebírat. Proto je další možností čistírenské kaly co nejefektivněji energeticky zhodnotit a zároveň získat fosfor ve formě, která by byla vhodná pro použití v zemědělství. Toho lze docílit zpětným získáváním fosforu z popela v případě spalování kalu (při množství 170 kt sušiny kalu za rok lze získat  $P_2O_5$  o množství 8,7 kt/rok), nebo aplikací tuhého zbytku z procesu pyrolýzy. Tuhý zbytek z pyrolýzy obsahuje kromě fosforu a karbonizovaného uhlíku, anorganickou složku kalu a těžké kovy. Karbonizovaný uhlík je v zemědělství prospěšný nejen proto, že na svém povrchu je schopný zadržovat vodu, ale také má dlouhou dobu rozpadu umožňující postupné uvolňování fosforu a zakonzervování těžkých kovů zamezující jejich uvolnění do půdy.

Asi 80 % produkovaného kalu připadá na ČOV s kapacitou přes 10 tis. EO, které jsou vybaveny biologickým stupněm hygienizace kalu. V závislosti na způsobu hygienizace se kalorický obsah sušiny kalu pohybuje v rozmezí 10-16 MJ/kg sušiny kalu. V produkovaném kalu se nachází energie v rozmezí  $1,7 \cdot 10^6$  GJ/rok (v případě spalování anaerobně stabilizovaného kalu) až po  $2,72 \cdot 10^6$  GJ/rok (v případě spalování směsného surového kalu).

Za účelem termického zpracování kalů, je nezbytné snížit obsah vody v kalu, který po mechanickém odvodnění je cca 70 až 75 % hm, což jej činí prakticky nespalitelným. Jedním z úkolů této práce je určení nejvýhodnějšího stupně vysušení kalu před jeho spalováním. Proto byl vytvořen výpočetní model sušárny v programu MS Excel s využitím rozhraní VBA, na základě kterého byla připravena implementace bloku sušárny do programu W2E. K přípravě modelu byly využity praktické poznatky k používaným pracovním podmínkám nízkoteplotní sušárny a typickému obsahu  $H_2O$  v odcházejícím odpadním plynu. V softwaru W2E byl následně model sušárny doplněn o zařízení na spalování kalů. Výsledný model umožňuje simulovat chování sestavy sušárny a spalovny kalu v závislosti na proměnné výstupní sušině kalu ze sušárny a vyhodnotit dopady na produkci a spotřebu energií.

V rámci práce byly posuzovány i možnosti spoluspalování kalů s fosilními palivy a odpady ve stávajících elektrárnách nebo teplárenských provozech, případně zařízení EVO, kdy je nahrazena část primárního paliva kalem. Spoluspalováním je dosaženo vyšší účinnosti výroby energie, protože se jedná o kapacitně a výkonově mnohem větší zařízení, než tomu může být při monospalování kalů. Vzhledem k tomu, že na kal je pohlíženo jako na odpad, je

nevýhodou spoluspalování odpadů s jinými palivy nutnost realizace opatření za účelem dodržení legislativních podmínek vztahujících se k režimu spoluspalování paliv s odpady.

V rámci této práce byly uvažovány dva případy velikosti ČOV. Prvním případem byla denní produkce směsného surového kalu 10 t/h odpovídající produkci kalu ČOV o velikosti přibližně 100 tis. EO a v druhém případě produkci sušiny směsného surového kalu 100 t/h, odpovídající velikosti ČOV o kapacitě 1 mil. EO. Pro tyto produkce směsného surového kalu bylo posuzováno, kolik energie ve formě tepelné energie a elektrické energie se dá získat při alternativní konfiguraci zpracování SSK. Variantně s anaerobním zpracováním nebo bez něho, odvodněním, sušením a termickém zpracování pomocí monospalování, nebo pyrolýzy.

Pro kapacity ČOV okolo 100 tis. EO a zpracovávání anaerobně stabilizovaného kalu v sestavě sušárna a spalování kalů, vychází z hlediska energetické spotřeby nejvýhodněji vysušit kal na 90 % sušiny, protože není třeba přídavného spalování zemního plynu pro stabilizaci hoření, jako je tomu při vysušení na 60–75 % sušiny kalu. Energetický zisk bilance produkce a spotřeby tepelné energie je sice vyšší než při vysušení na 90 % sušiny kalu (1,4 GJ/t sušiny ASK při vysušení na 60 % sušiny oproti 1,2 GJ/t sušiny ASK při vysušení na 90 % sušiny), ale z důvodu nízké výhřevnosti méně vysušeného spalovaného kalu (5,1–6,4 MJ/kg) je třeba zvýšit teplo dodávané do spalovacího prostoru spalováním přídavného paliva. Spalováním kalu o obsahu sušiny 60 % je spotřeba zemního plynu, jako přídavné palivo, až o 120 m<sup>3</sup>/t sušiny ASK vyšší než při spalování kalu vysušeného na 90 % sušiny.

Produkce energií ze spalování anaerobně stabilizovaného kalu, pro kapacity ČOV 10 t sušiny SSK denně a stupeň vysušení kalu na obsah 90 % sušiny, v případě kogeneračního režimu je produkce tepelné energie rovna 7,66 GJ/t sušiny ASK, produkce elektrické energie 132 kWh/t sušiny ASK (v případě bez kogeneračního režimu pouze s produkcí tepelné energie je produkce tepelné energie 8,15 GJ/t sušiny ASK) a spotřeba pro proces sušení 6,95 GJ/t sušiny ASK. Celková produkce tepelné energie ze spalování anaerobně stabilizovaného kalu vysušeného v sušárně na 90 % sušiny v sestavě sušárna/spalování kalu je 0,7–1,2 GJ/t sušiny ASK v závislosti na použití kogeneračního režimu a produkci elektrické energie.

V případě větších kapacit ČOV okolo 1 mil. EO bylo vytvořeno technologické schéma a výpočetní model spalování kalů ve vazbě na rozpracování problematiky energetického využití odpadů a kalů probíhajících v paralelně zpracovávaných disertačních pracích [96] a [97], kde je dále rozpracována možnost začlenění zařízení pro termické zpracování čistírenských kalů v součinnosti se zařízením na energetické využití odpadů a optimalizací využití odpadního tepla. Z energetické bilance soustavy sušárna a monospalovna kalu vychází nejefektivněji vysušení kalu v sušárně na 80–90 % sušiny. Při vysušení na 90 % sušiny v nízkoteplotní sušárně je nadprodukce tepelné energie 0,56 GJ/t sušiny ASK a chybějící množství elektrické energie 62,5 kWh/t sušiny ASK.

Technologický blok sloužící k energetickému zhodnocení kalů z ČOV musí být organicky začleněn do celého komplexu kalové koncovky. Kalová koncovka zahrnuje další procesy na záchyt, separaci a biochemické úpravy kalů, jako jsou anaerobní vyhnívání s produkcí bioplynu a jeho využití v kogeneračních jednotkách, odvodnění, případně termická

hydrolyza v porovnání technologického celku bez anaerobní stabilizace, pouze s odvodněním, sušením a spalováním. Při velikosti regionální ČOV o velikosti cca 100 tis. EO a kalové koncovky s anaerobní stabilizací vychází téměř všechny hodnocené varianty s nedostatečnou produkcí tepelné energie a je nutné ji do procesu dodat z externího zdroje. Jediná hodnocená varianta, která je energeticky soběstačná s mírnou nadprodukcí 1,31 GJ/t sušiny SSK tepelné energie a nadprodukcí 463 kWh/t sušiny SSK elektrické energie je technologický celek složený z anaerobní stabilizace, kogenerační jednotky, odvodnění pomocí odstředivky, sušení a monospalování kalu. Z pohledu tepelné energie je také soběstačná varianta s přímým spalováním směsného surového kalu bez anaerobní stabilizace (nadprodukce tepelné energie 6,57 GJ/t sušiny SSK), ale s nedostatečnou produkcí elektrické energie (deficit EE je 461 kWh/t sušiny SSK). Ostatní hodnocené varianty vyžadují externí dodávku tepelné energie. Jedná se o varianty s anaerobní stabilizací doplněnou o kogenerační jednotku, odvodnění na šroubovém lisu, sušení a spalování monospalovně kalu (celkové chybějící množství tepelné energie 0,61 GJ/t sušiny SSK při celkové produkci elektrické energie 463 kWh/t sušiny SSK v kogeneračním režimu monospalovny kalu a 0,12 GJ/t sušiny SSK tepelné energie při 351 kWh/t sušiny SSK elektrické energie ve variantě pouze s výrobou tepelné energie v monospalovně kalu). Nedostatek tepelné energie je také u obou variant s pyrolýzní jednotkou doplněné anaerobní stabilizací s kogenerační jednotkou, odvodněním pomocí šroubového lisu nebo odstředivky a sušárny. U varianty se šroubovým lisem je potřeba dodat tepelnou energii 2,87 GJ/t sušiny SSK a varianty s odstředivkou 1,21 GJ/t sušiny SSK. V tomto případě se nabízí integrace např. se zařízením na energetické využívání odpadů, nebo navýšení výkonu kogeneračních jednotek a spalování většího množství zemního plynu.

U velkých kapacit ČOV velikosti okolo 1 mil. EO je ve všech hodnocených variantách vyšší produkce tepelné energie než její spotřeba. Nadprodukce tepelné energie je od 2,87 GJ/t sušiny SSK (produkce elektrické energie 798 kWh/t sušiny SSK) u varianty s anaerobní stabilizací, odvodněním, sušením a spalováním kalu až po 7,49 GJ/t sušiny SSK (produkce elektrické energie 13 kWh/t sušiny SSK) v případě spalování SSK. Oproti menším kapacitám byla mezi porovnávané varianty zařazena, jako v poslední době v zahraničí často aplikovaná technologie, i sestava kalové koncovky s termickou hydrolyzou.

Pro účel porovnání všech variant z hlediska efektivnosti využití energií bylo upraveno kritérium R1 pro hodnocení zařízení na energetické využívání odpadů. Mezní hodnota kritéria R1 hodnocení zařízení na energetické využití odpadů je 0,65 pro zařízení povolená po 31. 12. 2008. Na základě tohoto upraveného kritéria R1 vychází nejefektivněji kalová koncovka v konfiguraci s anaerobní stabilizací, doplněná o termickou hydrolyzu anaerobně stabilizovaného kalu. Hodnota upraveného kritéria vychází 0,96, na rozdíl od varianty bez termické hydrolyzy 0,62, nebo přímého zpracování směsného surového kalu 0,5, kde není vlastní produkcí elektrické energie pokryta spotřeba kalové linky. Hlavní výhody technologie s termickou hydrolyzou jsou vyšší produkce bioplynu a redukce sušiny kalu, lepší odvodnitelnost kalu a s tím spojená nižší spotřeba sušáren.

Bylo zjištěno, že přímé spalování směsného surového kalu je výhodné pouze v případech, kde není zavedena již stávající anaerobní stabilizace, nebo je nutná její kompletní rekonstrukce a především pokud je zajištěn odběr přebytečné produkce tepelné energie. V ostatních případech je výhodnější sestava technologie s anaerobní stabilizací s využitím produkovaného bioplynu v kogeneračních jednotkách a spalování vyhnilého kalu, v ideálním případě doplněné o stupeň termické hydrolýzy.

Z výsledků práce vyplývá, že soustava zařízení sušárny a monospalování anaerobně stabilizovaných kalů může být za určitých podmínek soběstačná z hlediska produkce a spotřeby tepelné energie. Nejdůležitějším parametrem významně ovlivňujícím energetické hodnocení této sestavy je obsah sušiny vstupního kalu do sušárny (kvalita odvodnění). Mezní hodnotou obsahu vstupní sušiny kalu do sušárny pro energetickou soběstačnost je 28 % sušiny. Dosažení odvodnění vstupního kalu na 30 % sušiny je sestava soběstačná z hlediska tepelné energie a při sušení na 90 % sušiny je dosahováno produkce tepelné energie 0,617 GJ/t sušiny ASK. Vlivem nekvalitního odvodnění například pouze na 25 % sušiny na vstupu do sušárny je soustava nesoběstačná a je nutné do procesu dodat externí energii 1,60 GJ/t sušiny ASK. V tomto případě je vhodná integrace s jinými zdroji produkujícími nízkopotenciální teplo, pomocí kterého může být vyrovnán energetický deficit a dosaženo energetické soběstačnosti pomocí integrace dalšího zařízení.



## Význam zkratek a indexů

Zkratka	Význam
AOX	Absorbovatelné organické halogeny
ASK	Anaerobně stabilizovaný kal
CEN	Odstředivka
CZT	Centrální zásobování teplem
ČOV	Čistírna odpadních vod
DRYER	Sušárna kalu
DS	Obsah sušiny
EE	Elektrická energie
EO	Ekvivalent obyvatel
ESP	Elektrostatický odlučovač
EVO	Energetické využívání odpadů
FGT	Systém čištění spalin
HCEN	Odstředivka pro vyšší teploty kalu
HRSR	Kotel na odpadní teplo
KGJ	Kogenerační jednotka
KTJ	Kolonie tvořící jednotku
MAS	Mezofilní anaerobní stabilizace
MINC	Monospalovna kalu
MW	Molární hmotnost
PAH	Polycyklické aromatické uhlovodíky
PCDD/F	Polychlorované dibenzodioxiny a furany
PYR	Pyrolýzní jednotka
SCR	Selektivní katalytická redukce
SCREW	Šroubový lis
SNCR	Selektivní nekatalytická redukce
SSK	Směsný surový kal
SUŠ	Sušiny kalu
TAS	Termofilní anaerobní stabilizace
TE	Tepelná energie
TEQ	Ekvivalent toxicity
TH	Termická hydrolyza
TZL	Tuhé znečišťující látky
ÚČOV	Ústřední čistírna odpadních vod
UV	Ultrafialové
VBA	Visual Basic Application
VL	Organický podíl
VOC	Těkavé organické sloučeniny
W2E	Software Waste to energy

Index	Význam
ABS	Absorbované
BIG	Větších kapacit
BIOPL	Bioplyn
CER	Čerstvý proud
CIRK	Cirkulační
GRAN	Granulát
h	Hořlavina
HRSR	Kotel na odpadní teplo
HV	Horká voda
IGT	Institute of gas technology
KOND	Kondenzát
kor	Korigované
n	Za normálních podmínek
ODP	Odpadní proud
PAL	Palivo
PŘI	Prísávaný vzduch
REK	Rekuperátor
SAT	Saturační
SMALL	Menších kapacit
SPAL	Spaliny
STEAM	Pára
SUŠ	Sušina
TH	Tuhý zbytek
VL	Organické látky
VST	Vstup
VÝST	Výstup
VZD	Vzduch
ZAREK	Za rekuperační jednotkou
ZP	Zemní plyn
ZTR	Ztráty

## Význam veličin

Označení	Význam	Jednotka
E	Energie	MW
e	Měrná spotřeba tepla	kWh/(kg odp. H <sub>2</sub> O)
h, i	měrná entalpie	kJ/kg
HHV	Spalné teplo	kJ/kg
LHV	Výhřevnost	kJ/kg
m	Hmotnostní množství	kg
n	Látkové množství	kmol
p	Tlak	kPa
P	Příkon	kW
Q	Tepelná energie	MJ
r	Výparné teplo	kJ/kg
s	Měrná tvorba spalin	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg
t	Teplota	°C
T	Teplota	K
V	Objemové množství	m <sup>3</sup>
x	Hmotnostní zlomek	-

## Použitá literatura

- [1] The European Parliament and the Council of the European Union, *Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives*, 2008. [Online na WWW]: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008L0098:EN:NOT>. [cit.: 17-čer-2012].
- [2] Eurostat, Statistický úřad Evropských společenství, Klíčové ukazatele politiky EU - Strukturální ukazatele - Životní prostředí - komunální odpad, 2011, <[www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/municipal-waste-generation](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/municipal-waste-generation)> přístup 15. 4. 2013.
- [3] MANHART J., *Odpadová data MŽP 2015 a strategie ČR v odpadovém hospodářství*, Waste to Energy 2017, Praha, 20. března 2017
- [4] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadu*. Úřední věstník Evropské unie L 182, 1999.
- [5] MANHART J., *Cep v právních předpisech: Jaká změny nás čekají?*, Waste to Energy 2018, Praha, 22. března 2018
- [6] *Zákon č. 229/2014 Sb. ze dne 23. září 2014, kterým se kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů*, Sběrka zákonů ČR, 2014
- [7] ZUBEROVÁ J., VOLOŠINOVÁ D., *Zákaz ukládání recyklovatelných a využitelných odpadů na skládky*, Výzk. ústav vodohospodářský, TGM, Praha
- [8] BORÁŇ, J. *Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím*. Brno, 2008. 127s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [9] ELSÄßER, T. *Zpracování čistírenských kalů*. Brno, 2013. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc..
- [10] HOUDKOVÁ, L. *Efektivní využití čistírenských kalů*. Brno, 2009. 104 s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.
- [11] The European IPPC Bureau, *Reference Document on the Best Available Techniques for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector*, 2011. [Online]. Available: <http://eippcb.jrc.es/reference/cww.html>. [cit.: 17-čer-2012].
- [12] FRÝBA, L.; BÉBAR, L.; TOUŠ, M. *Evaluation of Sewage Sludge Co-incineration in the Existing Heating Plant or Power Plant from Emission Production Point of View*. Chemical Engineering Transactions. 2013. 2013(35). p. 823 - 828. ~1974-9791.ISSN

- [13] Koncepční návrh lokalizace výstavby nových zařízení EVO, ETAPA 3 - *Stabilita atraktivitu investičního záměru výstavby zařízení EVO v lokalitě Mělník*. Závěrečná zpráva k ETAPĚ 3
- [14] *Veřejná databáze ČSÚ* [online] [vid. 3. listopad 2013]. Dostupné z: [http://vdb.czso.cz/vdbvo/tabparam.jsp?voa=tabulka&cislatab=ZPR0061UU&&kapitola\\_id=1](http://vdb.czso.cz/vdbvo/tabparam.jsp?voa=tabulka&cislatab=ZPR0061UU&&kapitola_id=1)
- [15] VIGNESWARAN S., KANDASAMY J., *Sludge treatment technologies, in Water and Wastewater Treatment Technologies*, ( 2009), [Ed.Saravanamuthu (Vigi) Vigneswaran], in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK, [<http://www.eolss.net>] [Retrieved December 17, 2012]
- [16] ŠVEHLOVÁ, T. *Termické zpracování kalů z ČOV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 50 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [17] RÉDR, M.,PŘÍHODA, M.: *Základy tepelné techniky*. SNTL/ALFA, Praha, 1991, ISBN 80-00366-0
- [18] CHANNIWALA, S.A.: *On Biomass Gasification Process and Technology Development -some Analytical and Experimental Investigations*. Ph.D. Thesis. India: Indian Institute of Technology, Bombay, 1992.
- [19] *Odpady* [online] [vid. 3. listopad 2013]. Dostupné z: <http://isoh.cenia.cz/groupisoh/>
- [20] *Vyhláška č. 437/2016 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady a změně vyhlášky č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady)*. [online] [vid. 19. prosince 2016]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/582A4AE704964E60C125809E0037313C/%24file/V%20437\\_2016.pdf](https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/582A4AE704964E60C125809E0037313C/%24file/V%20437_2016.pdf)
- [21] *Směrnice rady ze dne 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství*, Úř. věst. L 181, 4.7.1986, s. 6—12. [Online na WWW]: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278&from=CS>
- [22] *Vyhláška č. 382/2001 Sb. Ministerstva životního prostředí o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě* [online] [vid. 17. října 2001]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/384b1f568b108495c12570060046ea82?OpenDocument>
- [23] Parlament ČR, *Zákon 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší*, 2012. [Online na WWW]: <http://www.psp.cz/ff/9a/09/6a/08.htm>. [cit.: 12-zář-2012].
- [24] Česká Republika. *Vyhláška o přípustné úrovni znečištění a jejich zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*: Sbíрка zákonů. In: č. 415/2012 Sb. Praha, 2012, 151/2012. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>.

- [25] *The european parliament and the council of the european union*. Directive 2010/75/EU on industrial emissions. 2010.
- [26] *Metodický pokyn MŽP ke spoluspalování odpadů*, ČAOH, Odborné články a aktuality, ČAOH informuje [online] [vid. 4. listopad 2013]. Dostupné z: <http://www.caoh.cz/odborne-clanky-a-aktuality/caoh-informuje-metodicky-pokyn-mzp-ke-spoluspalovani-odpadu.html>
- [27] HYŽÍK J., *Fluidní spalování – nástroj k energetickému využívání surových čistírenských kalů*. Alternativní energie, odborný časopis o obnovitelných zdrojích energie, č. 6, Praha, ISSN: 1212-1673, České ekologické manažerské centrum, 2002
- [28] PYTL, V., et al. *Příručka provozovatele čistírny odpadních vod*. 1. vyd. Praha, 2004. 209 s. ISBN 80-239-2528-8.
- [29] BARBER, B., *Thermal Hydrolysis: A critical review*, 2017, [WWW Document]. <https://doi.org/info:doi/10.2175/193864717822157531>
- [30] BARBER, W.P.F., *Thermal hydrolysis for sewage treatment: A critical review*. 2016. *Water Research* 104, 53–71. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.069>
- [31] HII, K., BAROUTIAN, S., PARTHASARATHY, R., GAPES, D.J., ESHTIAGHI, N., *A review of wet air oxidation and Thermal Hydrolysis technologies in sludge treatment*. 2014, *Bioresource Technology* 155, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.066>
- [32] LIAO, Z., PANTER, K., PEOT, C., LANCASTER, R., MILLS, N., KLEIVEN, M., N.D. *Thermal hydrolysis pre-treatment for advanced anaerobic digestion for sludge treatment and disposal in large scale projects*, 15.
- [33] ZHANG, J., LI, N., DAI, X., TAO, W., JENKINSON, I.R., LI, Z., *Enhanced dewaterability of sludge during anaerobic digestion with thermal hydrolysis pretreatment: New insights through structure evolution*. 2018. *Water Research* 131, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.042>
- [34] *Reduced biosolids odor production by 70% - Biosolids produced from Cambi-MAD reactors were consistently less odorous and of a higher solids concentration than those of Control-MAD*, Virginia Tech (Dr. Novak) paper on Cambi choice by DCWATER, US Biosolids Conference, 2008
- [35] *Cambi Thermal Hydrolysis, Theory, market and the future*, WEF eShowcase – 19 October 2016, Bill Barber, PhD, CEng, CEnv, MChemE, WEF eShowcase – 19 October 2016. [Online na WWW]: <https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/3---resources/online-education/eshowcases/handouts/presentation-handouts---cambi-eshowcase-2.pdf>. [cit.: 12-zář-2018]
- [36] THE NEW HILLER DecaPress: DP664 and DP764, [Online na WWW]: <https://www.hillerzentr.de/images/hiller-dp664-dp764-en.pdf>. [cit.: 12-zář-2018]
- [37] SKINNER, SAMUEL J; STICKLAND, ANTHONY D; CAVALIDA, RAUL G; USHER, SHANE P AND SCALES, PETER J. *Sewage sludge dewatering properties for predicting performance of industrial thickeners, centrifuges and filters* [online]. In: Asia Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress 2015: APCChE 2015, incorporating CHEMECA 2015. Melbourne: Engineers Australia, 2015: 2174-2185. Availability:

- <<https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=731981772857199;res=IEL ENG>> ISBN: 9781922107473. [cited 05 Nov 18]
- [38] YU, W., YANG, J., WU, X., GU, Y., XIAO, J., YU, J., SHI, Y., WANG, J., LIANG, S., LIU, B., HOU, H., HU, J., *Study on dewaterability limit and energy consumption in sewage sludge electro-dewatering by in-situ linear sweep voltammetry analysis*. 2017. Chemical Engineering Journal 317, 980–987. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.137>
- [39] Screw-Press solidXpress, [Online na WWW]: <https://suelzle-klein.de/en/products/screw-press/>. [cit.: 12-zář-2018].
- [40] ČOV Brno - Modřice | Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. [online] [vid. 3. listopad 2013]. Dostupné z: <http://www.bvk.cz/o-spolecnosti/odvadeni-a-cistení-odpadnich-vod/cov-brno-modrice/>
- [41] HASAN, M., ZHANG, Q., RIFFAT, R., AL-OMARI, A., MURTHY, S., HIGGINS, M.J., CLIPPELEIR, H.D., *Mechanistically Understanding the Dewatering Fundamentals: Impact of Biological Systems and Thermal Hydrolysis on Cake Total Solids and Polymer Demand*. Proceedings of the Water Environment Federation 2017, 997–1001. <https://doi.org/10.2175/193864717821495537>
- [42] Belt-Filter-Press SNP, [Online na WWW]: <https://suelzle-klein.de/en/products/screw-press/>. [cit.: 12-zář-2018].
- [43] Dekantační odstředivky | PBS Velká Bíteš, a.s. [online] [vid. 3. listopad 2013]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/dekantacni-odstredivky>
- [44] BIANCHINI, A., BONFIGLIOLI, L., PELLEGRINI, M., SACCANI, C., *Sewage sludge drying process integration with a waste-to-energy power plant*. 2015. Waste Management 42, 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.020>
- [45] TAŇCZUK, M., KOSTOWSKI, W., KARAŚ, M., *Applying waste heat recovery system in a sewage sludge dryer – A technical and economic optimization*. 2016. Energy Conversion and Management, Sustainable development of energy, water and environment systems for future energy technologies and concepts 125, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.064>
- [46] KREJČÍ, T. *Spoluspalování kalů v již stávajícím zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Frýba.
- [47] FRÝBA, L. *Analýza alternativ odstraňování PCDD/F při spalování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc..
- [48] The European Parliament and the Council of the European Union, *Directive 2008/1/EC concerning integrated pollution prevention and control*, 2008. [Online na WWW]: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008L0001:EN:NOT>. [cit.: 16-čer-2012].
- [49] S. VAN LOO A J. KOPPEJAN, ED., *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Routledge, 2007.
- [50] KROPÁČ, J. *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh systému čištění spalin z procesu termického zpracování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta

- strojního inženýrství, 2012. 158 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [51] The European IPPC Bureau, *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*, 2006. [Online na WWW]: <http://eippcb.jrc.es/reference/wi.html>. [cit.: 17-čer-2012].
- [52] CORTÉS, C.; GIL, A. *Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators*. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, č. 33, s. 409 – 452. ISSN 0360-1285.
- [53] JAWOREK, A.; KRUPA, A.; CZECH, T. *Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review*. Journal of Electrostatics, 2007, č. 65, s. 133 – 155. ISSN 0304-3886.
- [54] HANÁK, L.; JEDLIČKA, F.; DVOŘÁK, R.; JECHA, D.; STEHLÍK, P. *Reduction of Nox at new mobile experiment unit using catalytic filtration*. Chemical Engineering Transactions, vol. 25, pp. 333–338, 2011. ISSN 1974-9791.
- [55] BÉBAR L., STEHLÍK P.: *Legislativní předpisy ke snižování emisí a jejich požadavky na aplikaci, sborník přednášek semináře „Dioxiny a furany 2003“*, Skalský dvůr, 5.-6. června 2003
- [56] JOSEPH, G. T.; BEACHLER, D. S. *Scrubber Systems Operation Review - APTICourse SI:412C Second PDF*. North Carolina State University, 1998. [online]. [cit. březen 2013]. Dostupné z WWW: <<http://download.ebooks6.com/download.php?id=16399>>.
- [57] TOMASI MORGANO, M., LEIBOLD, H., RICHTER, F., STAPF, D., SEIFERT, H., *Screw pyrolysis technology for sewage sludge treatment*. 2018. Waste Management 73, 487–495. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.049>
- [58] JAYARAMAN, K., GÖKALP, I., *Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge*. 2015. Energy Conversion and Management 89, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.058>
- [59] FRÝBA L., KOS M., *Materiálová transformace čistírenského kalu z energetického hlediska*, Nové metody a postupy při provozování čistíren odpadních vod, 23. ročník, Moravská Třebová, 10.-11.4.2018, Sborník přednášek ze semináře, str. 41-49
- [60] HELLMICH P., FUKA J., *Příprava projektu zpracování kalů sušením a pyrolýzou na ČOV Trutnov*, Konference Kaly a odpady 2018, Brno, 20-21.6.2018, str. 101-108.
- [61] T:CRACKER - Industrial Pyrolysis. [Online na WWW]: <https://nge.at/en/technology/>. [cit.: 12-zář-2018].
- [62] CHEN, G.-B., LI, J.-W., LIN, H.-T., WU, F.-H., CHAO, Y.-C., *A Study of the Production and Combustion Characteristics of Pyrolytic Oil from Sewage Sludge Using the Taguchi Method*. Energies 11, 2260. <https://doi.org/10.3390/en11092260>
- [63] TAOZE LIU, BANGYU LIU, WEI ZHANG, *Nutrients and Heavy Metals in Biochar Produced by Sewage Sludge Pyrolysis: Its Application in Soil Amendment*. 2014. Polish Journal of Environmental Studies 23, 271–275.
- [64] WERLE, S., *Gasification of a Dried Sewage Sludge in a Laboratory Scale Fixed Bed Reactor*. 2015. Energies 8, 8562–8572. <https://doi.org/10.3390/en8088562>

- [65] CHOI, Y.-K., MUN, T.-Y., CHO, M.-H., KIM, J.-S., *Gasification of dried sewage sludge in a newly developed three-stage gasifier: Effect of each reactor temperature on the producer gas composition and impurity removal*. 2016. Energy 114, 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.166>
- [66] WERLE, S., DUDZIAK, M., *Analysis of Organic and Inorganic Contaminants in Dried Sewage Sludge and By-Products of Dried Sewage Sludge Gasification*. 2014. Energies 7. <https://doi.org/10.3390/en7010462>
- [67] LEE G.A. POTTS, DUNCAN J. MARTIN, *Anaerobic digestion, gasification, and pyrolysis, in Waste Management and Minimisation*, (2004), [Eds. Stephen R. Smith, and Nick Blakey], in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford ,UK, [<http://www.eolss.net>] [Retrieved December 17, 2012]
- [68] *SynGas CHP Module*. [Online na WWW]: <https://suelzle-kopf.de/en/syngas/solutions/chp-module/>. [cit.: 12-zář-2018].
- [69] *Typový list kogenerační jednotky Klasik MGW 700*. [Online na WWW]: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwja\\_NGqm6reAhUClosKHZT0Bs8QFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.motorgas.cz%2Fgallery%2F0%2F281-typlist\\_mgw700\\_klasik\\_zp\\_cz.pdf&usq=AOvVaw0RB3uhcsLI8fRCJMyrjuzw](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwja_NGqm6reAhUClosKHZT0Bs8QFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.motorgas.cz%2Fgallery%2F0%2F281-typlist_mgw700_klasik_zp_cz.pdf&usq=AOvVaw0RB3uhcsLI8fRCJMyrjuzw). [cit.: 12-zář-2018].
- [70] SÜLZLE KLEIN [Online na WWW]:<https://suelzle-klein.de/en/>. [cit.: 12-zář-2018].
- [71] IAPWS R7-97(2012) *Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam*, August 2007. [Online na WWW]: <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.html>. [cit.: 12-zář-2018].
- [72] JELINEK J., *Výzkum a vývoj modernizovaných bloků konverze metanu - doporučené postupy pro výpočet látkových vlastností, výzkumná zpráva VÚCHZ č. 1/010/86, Brno, 1986*
- [73] PUTNA, O. *Uplatnění zařízení pro energetické využití odpadů malých zpracovatelských kapacit v podmínkách ČR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [74] KRŇÁVEK, M. *Regionální energetické využití odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc..
- [75] *Začlenění parních turbín do zařízení pro energetické využití odpadu*, Výzkumná zpráva, Centrum kompetence pro energetické využití odpadů – „WtE Competence Centre“
- [76] URBANCL, D., ZLAK, J., ANICIC, B., TROP, P., GORICANEC, D., *The evaluation of heat production using municipal biomass co-incineration within a thermal power plant*. 2016. Energy, Sustainable Energy and Environmental Protection 2014 108, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.064>
- [77] YU, L., ZHENG, J., YUAN, X., SONG, H., PENG, J., REN, M., *Characterization and Mass Balance of PCDD/Fs During the Co-combustion of Sewage Sludge in a*



- Grate-type Municipal Solid Waste Incineration*. 2016. *Procedia Environmental Sciences* 31, 303–308. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.040>
- [78] PAVLÍK, Z., FOŘT, J., ZÁLESKÁ, M., PAVLÍKOVÁ, M., TRNÍK, A., MEDVED, I., KEPPERT, M., KOUTSOUKOS, P.G., ČERNÝ, R., *Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements*. 2016. *Journal of Cleaner Production* 112, 409–419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.072>
- [79] KUMAR, R., SINGH, R.I., *An investigation of co-combustion municipal sewage sludge with biomass in a 20kW BFB combustor under air-fired and oxygen-enriched condition*. 2017. *Waste Management* 70, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.005>
- [80] LIU, J., HUANG, L., SUN, G., CHEN, J., ZHUANG, S., CHANG, K., XIE, W., KUO, J., HE, Y., SUN, S., BUYUKADA, M., EVRENDILEK, F., *(Co-)combustion of additives, water hyacinth and sewage sludge: Thermogravimetric, kinetic, gas and thermodynamic modeling analyses*. 2018. *Waste Management* 81, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.030>
- [81] CHANG, N.-B., DAVILA, E., *Municipal solid waste characterizations and management strategies for the Lower Rio Grande Valley, Texas*. 2008. *Waste Management* 28, 776–794. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.04.002>
- [82] DENG, W., YAN, J., LI, X., WANG, F., CHI, Y., LU, S., *Emission characteristics of dioxins, furans and polycyclic aromatic hydrocarbons during fluidized-bed combustion of sewage sludge*. 2009. *Journal of Environmental Sciences* 21, 1747–1752. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62483-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62483-3)
- [83] LU, M., WU, X.-J., ZENG, D.-C., LIAO, Y., *Distribution of PCDD/Fs and organometallic compounds in sewage sludge of wastewater treatment plants in China*. 2012. *Environmental Pollution* 171, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.035>
- [84] MININNI, G., SBRILLI, A., GUERRIERO, E., ROTATORI, M., *Dioxins and furans formation in pilot incineration tests of sewage sludge spiked with organic chlorine*. 2004. *Chemosphere* 54, 1337–1350. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00252-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00252-2)
- [85] PARK, J.M., LEE, S.B., KIM, J.P., KIM, M.J., KWON, O.S., JUNG, D.I., *Behavior of PAHs from sewage sludge incinerators in Korea*. 2009. *Waste Management* 29, 690–695. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.015>
- [86] VAN DE VELDEN, M., DEWIL, R., BAEYENS, J., JOSSON, L., LANSSENS, P., *The distribution of heavy metals during fluidized bed combustion of sludge (FBSC)*. 2008, *Journal of Hazardous Materials* 151, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.056>
- [87] ZHANG, G., HAI, J., CHENG, J., CAI, Z., REN, M., ZHANG, S., ZHANG, J., *Evaluation of PCDD/Fs and metals emission from a circulating fluidized bed incinerator co-combusting sewage sludge with coal*. 2013. *Journal of Environmental Sciences* 25, 231–235. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60009-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60009-6)
- [88] MILLS N., *Unlocking the Full Energy Potential of Sewage Sludge*, Doctor of Engineering thesis, University of Surrey/Thames water, 2016

- [89] MENG, X., HUANG, Q., GAO, H., TAY, K., YAN, J., *Improved utilization of phosphorous from sewage sludge (as Fertilizer) after treatment by Low-Temperature combustion*. 2018. *Waste Management* 80, 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.034>
- [90] THOMSEN, T.P., SÁROSSY, Z., AHRENFELDT, J., HENRIKSEN, U.B., FRANDBSEN, F.J., MÜLLER-STÖVER, D.S., *Changes imposed by pyrolysis, thermal gasification and incineration on composition and phosphorus fertilizer quality of municipal sewage sludge*. 2017. *Journal of Environmental Management* 198, 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.072>
- [91] GORAZDA, K., TARKO, B., WZOREK, Z., KOMINKO, H., NOWAK, A.K., KULCZYCKA, J., HENCLIK, A., SMOL, M., *Fertilisers production from ashes after sewage sludge combustion – A strategy towards sustainable development*. 2017. *Environmental Research* 154, 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.002>
- [92] *Guidelines on the RI energy efficiency*. In: Evropská komise [online]. 2011 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/pdf/guidance.pdf>
- [93] POHOŘELÝ, M.; ŠYC, M.; SVOBODA, K.; KRUML, M.; MOŠKO, J.; ZACH B.; DURDAT.; SKOBLIA, S.; BEŇO Z.: *Recyklace fosforu ze stabilizovaného čistírenského kalu*. Sborník přednášek konference CHEO 11, pp. 1–17, Praha, Czech Republic, 07 September 2016.
- [94] *Souhrnná technická zpráva ke skutečnému provedení spalovny 10 kt/rok.*, VUCHZ, říjen 1999
- [95] CERAM-IBIDEN. *Ceram - Company. Ceram - SCR catalysts*. [Online] CERAM-IBIDEN. [Citace: 28. 3 2017.] Dostupné z: <http://www.ceram-ibiden.com/index.php?tabid=302>.
- [96] KREJČÍ, T. *Moderní systémy čištění spalin regionálních soustav pro energetické využití odpadů*. Písemné pojednání ke státní závěrečné zkoušce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [97] KRŇÁVEK, M. *Regionální energetické využití odpadů*. Písemné pojednání ke státní závěrečné zkoušce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

## Publikační činnost

- [1] KREJČÍ, T.; KRŇÁVEK, M.; FRÝBA, L.; BÉBAR, L.; STEHLÍK, P. *Modelové řešení zařízení pro termické zpracování kalů - DV074*. Brno: 2018.
- [2] FRÝBA L., KOS M., *Materiálová transformace čistírenského kalu z energetického hlediska.*, Nové metody a postupy při provozování čistíren odpadních vod, 23. ročník, Moravská Třebová, 10.-11.4.2018, Sborník přednášek ze semináře, str. 41-49
- [3] FERDAN, T.; ŠOMPLÁK, R.; ZAVÍRALOVÁ, L.; PAVLAS, M.; FRÝBA, L. *A Waste-to-Energy Project: A Complex Approach towards the Assessment of Investment Risks*. Applied Thermal Engineering, 2015, vol. 89, no. 1, p. 1127-1136. ISSN: 1359-4311.
- [4] FERDAN, T.; PAVLAS, M.; KROPÁČ, J.; FRÝBA, L.; PUTNA, O.; ŠOMPLÁK, R. *Základy pro technicko-ekonomický model zařízení na energetické využití odpadu*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 2014.
- [5] PUTNA, O.; KROPÁČ, J.; FRÝBA, L.; PAVLAS, M. *Prediction of Heating Value of Waste and Its Importance for Conceptual Development of New Waste-to-Energy Plants*. In Proceedings of the 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milano, Italy: Aidic Servizi S.r.l., 2014. p. 1273-1278. ISBN: 978-88-95608-30-3. ISSN: 2283-9216.
- [6] FRÝBA, L.; BÉBAR, L.; TOUŠ, M. *Analysis of Requirement for Sewage Sludge Incineration*. In Proceedings of the 17th CONFERENCE ON PROCESS INTEGRATION, MODELLING AND OPTIMISATION FOR ENERGY SAVING AND POLLUTION REDUCTION PRES 2014. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milano, Italy: AIDIC Servizi S.r.l., 2014. p. 631-636. ISBN: 978-88-95608-30-3. ISSN: 2283-9216.
- [7] ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M.; FERDAN, T.; KROPÁČ, J.; FRÝBA, L.; PUTNA, O.; STEHLÍK, P. *Simulace skládkovacího poplatku na tok odpadu v ČR a náklady na jeho zpracování*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 2014.
- [8] FRÝBA, L.; KROPÁČ, J. *Využití moderních systémů čištění spalin*. ENERGETICKÝ PARTNER, 2013, roč. 1, č. 2, s. 18-25. ISSN: 1805-7845.
- [9] TOUŠ, M.; FRÝBA, L.; PAVLAS, M. *Improving Calculation of Lower Heating Value of Waste by Data Reconciliation – Analysis and Evaluation*. Chemical Engineering Transactions, 2013, vol. 2013, no. 35, p. 877-882. ISSN: 1974-9791.
- [10] FRÝBA, L.; BÉBAR, L.; TOUŠ, M. *Evaluation of Sewage Sludge Co-incineration in the Existing Heating Plant or Power Plant from Emission Production Point of View*. Chemical Engineering Transactions, 2013, vol. 2013, no. 35, p. 823-828. ISSN: 1974-9791.
- [11] BENÁČKOVÁ, J.; FRÝBA, L.; PAVLAS, M.; FERDAN, T. *Determination of boiler efficiency and lower heating value of municipal solid waste at real waste-to-*

- energy plant*. In Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2012. Hradec Králové, The Czech Republic: 2013. p. 3072-3081. ISBN: 978-80-905243-3-0.
- [12] FRÝBA, L.; KROPÁČ, J. *Energetická účinnost moderních zařízení pro energetické využití odpadu*. ENERGETICKÝ PARTNER, 2013, roč. 1, č. 3, s. 18-25. ISSN: 1805-7845.
- [13] BENÁČKOVÁ, J.; FRÝBA, L.; PAVLAS, M.; HEJL, M. *Determination of Lower Heating Value of Municipal Solid Waste by Mathematical Analysis of a Plant Production Data from a Real Waste-to-Energy Plant*. Chemical Engineering Transactions, 2012, vol. 2012, no. 29, p. 721-726. ISSN: 1974-9791.

## Příloha 1: Produkce odpadů v ČR

Tab. 36: Produkce odpadů v ČR pro roky 2008 až 2017

Rok	Produkce odpadů celkem	z toho podnikový odpad	z toho podle ekonomických činností (CZ-NACE)								komunální odpad
			zemědělství, lesnictví, rybníkářství	těžba a dobývání	zpracovatelský průmysl	výroba a rozvod elektřiny, plynu, tepla a klimatizovaného vzduchu	činnosti související s odpadními vodami, odpady a sanacemi	stavebnictví	doprava a skladování	ostatní	
2017	24926	20884	113	95	5180	646	3636	8987	216	2409	3643
2016	25758	21802	115	144	4671	889	3632	10142	253	2333	3580
2015	26947	23247	105	191	4563	1166	3636	11308	228	2413	3337
2014	23789	20236	135	335	4394	1012	2944	9410	248	2049	3261
2013	23724	20127	180	213	4417	1007	2887	8694	232	2865	3228
2012	23436	19939	196	167	4376	1063	2800	8593	232	2776	3233
2011	23576	19919	214	167	4780	1106	2203	8774	273	2701	3358
2010	24124	20423	114	115	4202	1540	2507	9354	178	2779	3334
2009	24236	20514	176	132	4232	1721	1975	10016	243	2431	3310
2008	25869	22244	255	167	5293	1920	1912	10651	294	2202	3176

## Příloha 2: Produkce a nakládání s kaly v ČR

Tab. 37: Produkce a nakládání s kaly v ČR pro roky 2007 až 2012

Způsob nakládání	Označení	2012		2011		2010		2009		2008		2007	
		+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
<b>Produkce</b>	A00	<b>162021</b>	0	<b>163739</b>	0	<b>162716</b>	0	<b>168860</b>	0	<b>543846</b>	0	<b>231516</b>	0
Skládkování	AD1 BD1 CD1	0	407	0	307	0	1226	0	4981	0	16398	0	14638
Spalování na pevně	AD10 BD10 CD10	0	46	0	61	0	0	0	0	0	0	0	2
Úprava složení před odstraněním pod označením D1 až D12	AD13 BD13 CD13	0	307	0	226	0	6	0	49	0	18	0	23
Úprava jiných vlastností před odstraněním pod označením D1 až D13	BD14 CD14	0	21	0	9	0	0	0	108	0	0	0	853
Skladování před odstraněním pod označením D1 až D14 (kromě dočasného)	AD15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Úprava půdními procesy	AD2 BD2 CD2	0	119	0	42	0	75	0	113	0	243	0	2075
Hlubinná injektáž	BD3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ukládání do povrchových nádrží	AD4 BD4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	22	0	7
Ukládání do speciálně technicky provedených skládek	AD5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0
Biologická úprava	AD8 BD8 CD8	0	27036	0	25749	0	26653	0	32034	0	131075	0	41963
Fyzikálně-chemická úprava	AD9 BD9 CD9	0	766	0	763	0	3858	0	1093	0	6976	0	17719
Využití odpadů na terénní úpravy s výjimkou využívání kalů	AN1 BN1 CN1	0	3036	0	1785	0	8693	0	9530	0	45960	0	12856
"Prodej odpadů jako suroviny („druhotné suroviny“)"	AN10 BN10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
Využití odpadů na rekultivace skládek	BN11	0	241	0	375	0	399	0	265	0	3193	0	7388
Ukládání odpadů jako technologický materiál na zajištění skládky	AN12 BN12	0	1894	0	1541	0	3103	0	1233	0	8337	0	12767
Kompostování	AN13 BN13 CN13	0	42023	0	40609	0	39669	0	51092	0	168427	0	117265
Biologická dekontaminace	AN14 BN14 CN14	0	220	0	443	0	774	0	869	0	3827	0	2263
Předání kalů ČOV k použití na zemědělské půdě	AN2 BN2 CN2	0	22985	0	18898	0	22613	0	26469	0	78609	0	33104
Předání jiné oprávněné osobě (kromě přepravce, dopravce)	AN3 BN3 CN3	0	234063	0	232917	0	224735	0	224818	0	817800	0	430822
Převzetí zpětně odebraných některých výrobků nebo elektrozařízení	BN30	81	0	95	0	242	0	292	0	1596	0	0	0
Odpad po úpravě, když nedošlo ke změně katalogového čísla odpadu	BN40	491	0	288	0	106	0	561	0	885	0	0	0
Zůstatek na skladu k 31. prosinci vykazovaného roku	AN5 BN5 CN5	0	11973	0	11769	0	11463	0	9468	0	91113	0	55684
Předání (díků, odpadů) pro opětovné použití	AN8	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0
Inventurní rozdíl - vyrovnání nedostatku odpadu	BN50	0	0	332	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Inventurní rozdíl - vyrovnání přebytku odpadu	AN53 BN53 CN53	0	3625	0	4599	0	3738	0	1684	0	1318	0	0
Staré zátěže, živelní pohromy, černé skládky apod.	AN63	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0
Přeshraniční přeprava odpadů z členského státu EU do ČR	BN6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Využití odpadů jako paliva nebo k výrobě energie	AR1 BR1 CR1	0	2146	0	1779	0	3035	0	2655	0	13928	0	3351
Aplikace do půdy, která je přínosem pro zemědělství nebo zlepšuje ekologii	AR10 BR10 CR10	0	12777	0	1664	0	4640	0	3747	0	17596	0	26879
Využití odpadů, které vznikly pod označením R1 až R10	AR11 BR11 CR11	0	946	0	888	0	2360	0	574	0	1585	0	226
Předúprava odpadů k aplikaci pod označením R1 až R11	AR12 BR12 CR12	0	21587	0	24161	0	22238	0	22435	0	72839	0	7486
Skladování materiálu před aplikací pod označením R1 až R12 (kromě dočasného)	AR13 BR13	0	197	0	9840	0	51	0	1606	0	1402	0	841
Získání / regenerace organických látek	AR3 BR3 CR3	0	8210	0	7768	0	7203	0	5199	0	31541	0	35230
Recyklace / znovuzískání ostatních anorganických materiálů	BR5 CR5	0	9187	0	10350	0	6437	0	2075	0	0	0	3000
Obnova látek používaných ke snižování znečištění	AR7 BR7	0	4	0	13	0	17	0	88	0	44	0	46

Tab. 38: Produkce a nakládání s kaly v ČR pro roky 2002 až 2006

Způsob nakládání	Označení	2006		2005		2004		2003		2002	
		+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
<b>Produkce</b>	A00	<b>220680</b>	0	<b>229388</b>	0	<b>242426</b>	0	<b>469440</b>	0	<b>480400</b>	0
Skládkování	AD1 BD1 CD1	0	20647	0	33558	0	60146	0	38383	0	21618
Spalování na pevnině	AD10 BD10 CD10	0	0	0	0	0	11	0	33	0	237
Úprava složení před odstraněním pod označením D1 až D12	AD13 BD13 CD13	0	24	0	227	0	222	0	14629	0	16481
Úprava jiných vlastností před odstraněním pod označením D1 až D13	BD14 CD14	0	128	0	0	0	0	0	0	0	0
Skladování před odstraněním pod označením D1 až D14 (kromě dočasného)	AD15	0	0	0	0	0	0	0	158	0	0
Úprava půdními procesy	AD2 BD2 CD2	0	580	0	660	0	2764	0	3705	0	24840
Hlubinná injektáž	BD3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4185
Ukládání do povrchových nádrží	AD4 BD4	0	28	0	0	0	1859	0	793	0	5422
Ukládání do speciálně technicky provedených skládek	AD5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Biologická úprava	AD8 BD8 CD8	0	32208	0	15084	0	35615	0	19053	0	31228
Fyzikálně-chemická úprava	AD9 BD9 CD9	0	25431	0	22650	0	7467	0	19467	0	60183
Využití odpadů na terénní úpravy s výjimkou využívání kalů	AN1 BN1 CN1	0	16952	0	33148	0	371053	0	221579	0	236392
"Prodej odpadu jako suroviny („druhotné suroviny“)" "	AN10 BN10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Využití odpadu na rekultivace skládek	BN11	0	282	0	1274	0	0	0	0	0	0
Ukládání odpadů jako technologický materiál na zajištění skládky	AN12 BN12	0	19703	0	17224	0	0	0	0	0	0
Kompostování	AN13 BN13 CN13	0	93362	0	156165	0	0	0	0	0	0
Biologická dekontaminace	AN14 BN14 CN14	0	926	0	0	0	0	0	0	0	0
Předání kalů ČOV k použití na zemědělské půdě	AN2 BN2 CN2	0	19813	0	19504	0	17065	0	47028	0	41576
Předání jiné oprávněné osobě (kromě přepravce, dopravce)	AN3 BN3 CN3	0	399656	0	363552	0	380145	0	509338	0	465906
Převzetí zpětně odebraných některých výrobků nebo elektrozařízení	BN30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Odpad po úpravě, když nedošlo ke změně katalogového čísla odpadu	BN40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zůstatek na skladu k 31. prosinci vykazovaného roku	AN5 BN5 CN5	0	56401	0	32483	0	17576	0	16383	0	10553
Předání (dílů, odpadů) pro opětovné použití	AN8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inventurní rozdíl - vyrovnání nedostatku odpadu	BN50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inventurní rozdíl - vyrovnání přebytku odpadu	AN53 BN53 CN53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Staré zátěže, živelní pohromy, černé skládky apod.	AN63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Přeshraniční přeprava odpadu z členského státu EU do ČR	BN6	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0
Využití odpadu jako paliva nebo k výrobě energie	AR1 BR1 CR1	0	1673	0	43	0	145	0	180	0	525
Aplikace do půdy, která je přínosem pro zemědělství nebo zlepšuje ekologii	AR10 BR10 CR10	0	5626	0	7891	0	14215	0	12411	0	7882
Využití odpadů, které vznikly pod označením R1 až R10	AR11 BR11 CR11	0	0	0	939	0	21703	0	14330	0	12079
Předúprava odpadu k aplikaci pod označením R1 až R11	AR12 BR12 CR12	0	3866	0	16659	0	5852	0	10458	0	1817
Skladování materiálu před aplikací pod označením R1 až R12 (kromě dočasných)	AR13 BR13	0	41	0	177	0	0	0	0	0	0
Získání / regenerace organických látek	AR3 BR3 CR3	0	36195	0	29711	0	130030	0	134712	0	117672
Recyklace / znovuzískání ostatních anorganických materiálů	BR5 CR5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	137
Obnova látek používaných ke snižování znečištění	AR7 BR7	0	38	0	77	0	67	0	106	0	0

## Příloha 3: Emisní limity pro stanovení $C_{proc}$

Tab. 39: Emisní limity pro stanovení  $C_{proc}$  pro stacionární zdroje s výjimkou plynových turbin a plynových motorů platné do 31. 12. 2015

Druh paliva	Emisní limity [mg/m <sup>3</sup> ]											
	<50 MW			50 - 100 MW			100 - 300 MW			>300 MW		
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL
Pevné palivo obecně	-	-	50	850	400	50	200	200	30	200	200	30
Biomasa	-	-	50	200	350	50	200	300	30	200	200	30
Kapalné palivo	-	-	50	850	400	50	400 - 200 <sup>i)</sup>	200	30	200	200	30

Pozn:

<sup>i)</sup> Hodnota  $C_{proc}$  v tomto rozmezí lineárně poklesne tak, že se rovná 500 – P, kdy P je celkový jmenovitý tepelný příkon spalovacích stacionárních zdrojů [MW]

Tab. 40: Emisní limity pro stanovení  $C_{proc}$  pro stacionární zdroje s výjimkou plynových turbin a plynových motorů platné od 1. 1. 2016, pro něž byla podána kompletní žádost do 7. 1. 2013 a byly uvedeny do provozu nejpozději do 7. 1. 2014

Druh paliva	Emisní limity [mg/m <sup>3</sup> ]											
	<50 MW			50 - 100 MW			100 - 300 MW			>300 MW		
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL
Pevné palivo obecně	-	-	50	400	300 400 <sup>i)</sup>	30	200	200	25	200	200	20
Rašelina	-	-	50	300	400	30	200	200	20	200	200	20
Biomasa	-	-	50	200	300	30	200	250	20	200	200	20
Kapalné palivo	-	-	50	350	400	30	250	200	25	200	150	20

Pozn:

<sup>i)</sup> Platí pro práškové hnědé uhlí



Tab. 41: Emisní limity pro stanovení  $C_{proc}$  pro stacionární zdroje s výjimkou plynových turbin a plynových motorů platné od 1. 1. 2016, pro něž byla podána kompletní žádost od 7. 1. 2013, nebo byly uvedeny do provozu od 7. 1. 2014

Druh paliva	Emisní limity [mg/m <sup>3</sup> ]											
	<50 MW			50 - 100 MW			100 - 300 MW			>300 MW		
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	TZL
Pevné palivo obecně	-	-	50	400	300	20	200	200	20	150 200 <sup>i)</sup>	150 200 <sup>ii)</sup>	10
Rašelina	-	-	50	300	250	20	300 250 <sup>iii)</sup>	200	20	150 200 <sup>iii)</sup>	150	20
Biomasa	-	-	50	200	250	20	200	200	20	200	150	20
Kapalné palivo	-	-	50	350	300	20	200	150	20	200	100	10

Pozn:

- i) Platí pro cirkulační nebo tlakové spalování v fluidním loži
- ii) Platí pro spalování hnědého uhlí
- iii) Platí pro spalování v fluidním loži

## Příloha 4: Četnost použití různých druhů ohnišť pro rozdílná paliva

Tab. 42: Vhodnost použití ohnišť pro různé druhy odpadů

Technologie	Směsný komunální odpad	Předupravený komunální odpad alternativní palivo vytvořené z odpadu	Nebezpečné odpady	Kaly	Klinické odpady
Vratný rošt	Často používáno	Často používáno	Není běžně používáno	Není běžně používáno	Používáno
Posuvný rošt	Používáno	Používáno	Málo používáno	Není běžně používáno	Používáno
Kyvňový rošt	Používáno	Používáno	Málo používáno	Není běžně používáno	Používáno
Válcový rošt	Používáno	Často používáno	Málo používáno	Není běžně používáno	Používáno
Vodou chlazený rošt	Používáno	Používáno	Málo používáno	Není běžně používáno	Používáno
Roštový s rotační pecí	Používáno	Není běžně používáno	Málo používáno	Není běžně používáno	Používáno
Rotační pec	Není běžně používáno	Používáno	Často používáno	Používáno	Často používáno
Rotační pec vodou chlazená	Není běžně používáno	Používáno	Používáno	Používáno	Používáno
Pevné ohniště	Není běžně používáno	Není běžně používáno	Používáno	Není běžně používáno	Často používáno
Pec	Není běžně používáno	Není běžně používáno	Často používáno	Není běžně používáno	Používáno
Fluidní lože - probublávající	Málo používáno	Používáno	Není běžně používáno	Používáno	Není běžně používáno
Fluidní lože - cirkulující	Málo používáno	Používáno	Není běžně používáno	Často používáno	Není běžně používáno
Fluidní lože - rotující	Používáno	Používáno	Není běžně používáno	Používáno	Používáno
Pyrolýza	Málo používáno	Málo používáno	Málo používáno	Málo používáno	Málo používáno
Zplyňování	Málo používáno	Málo používáno	Málo používáno	Málo používáno	Málo používáno

Pozn:

Tato tabulka uvádí pouze technologie specializované na spalování jednoho druhu paliva, proto zde není zahrnuto spalování více paliv najednou.

## Příloha 5: Parametry jednotky MGW700 od firmy Motorgas [69]

Bilanční tabulka

% zatížení	100,0%	75,0%	50,0%
Příkon v palivu [kW]	1 932	1 549	1 070
Mechanický výkon motoru [kW]	730	548	365
Měrná spotřeba paliva [MJ/kWh]	9,89	10,56	11,00
Spotřeba zemního plynu [m <sup>3</sup> /h]	196,6	157,6	108,9
Účinnost alternátoru [%]	96,3%	96,4%	96,0%
Elektrický výkon [kW]	703	528	350
Tepelný výkon [kW]	939	770	541
Tepelný výkon z chlazení motoru [kW]	520	448	320
Tepelný výkon z chlazení oleje [kW]	90	60	50
Tepelný výkon mezichladiče [kW]	80	65	30
Tepelný výkon spalin [kW]	329	262	171
Mechanická účinnost motoru [kW]	37,8%	35,3%	34,1%
Elektrická účinnost [%]	36,4%	34,1%	32,7%
Tepelná účinnost [%]	48,6%	49,7%	50,6%
Celková účinnost [%]	85,0%	83,8%	83,3%
Množství spalovacího vzduchu [m <sup>3</sup> /h]	2937	2 270	1 524
Teplota spalin [°C]	400	400	394
Množství spalin [kg/h]	3 760	2 990	2 000
Cp výfukových plynů [kJ/kg.K]	1,125	1,125	1,125
Tepelné ztráty [kW]	77	62	43

Výhřevnost paliva normální [MJ/m<sup>3</sup>] 35,38

Dochlazení spalin na 120 °C

Všechny výkonové parametry jsou stanoveny podle ISO 3046

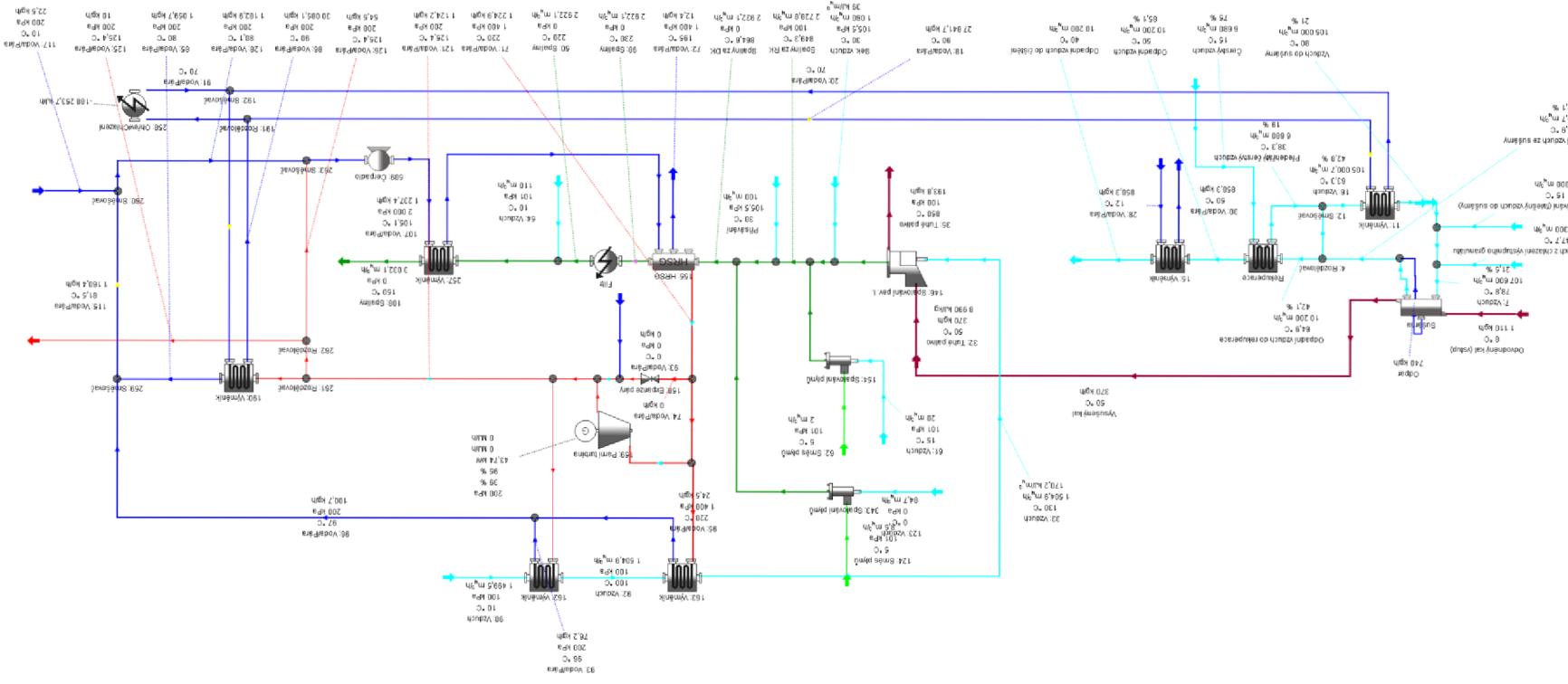
Pro jmenovité atmosférické podmínky tj.

Tlak 100kPa, teplota 25°C a relativní vlhkost vzduchu 30%

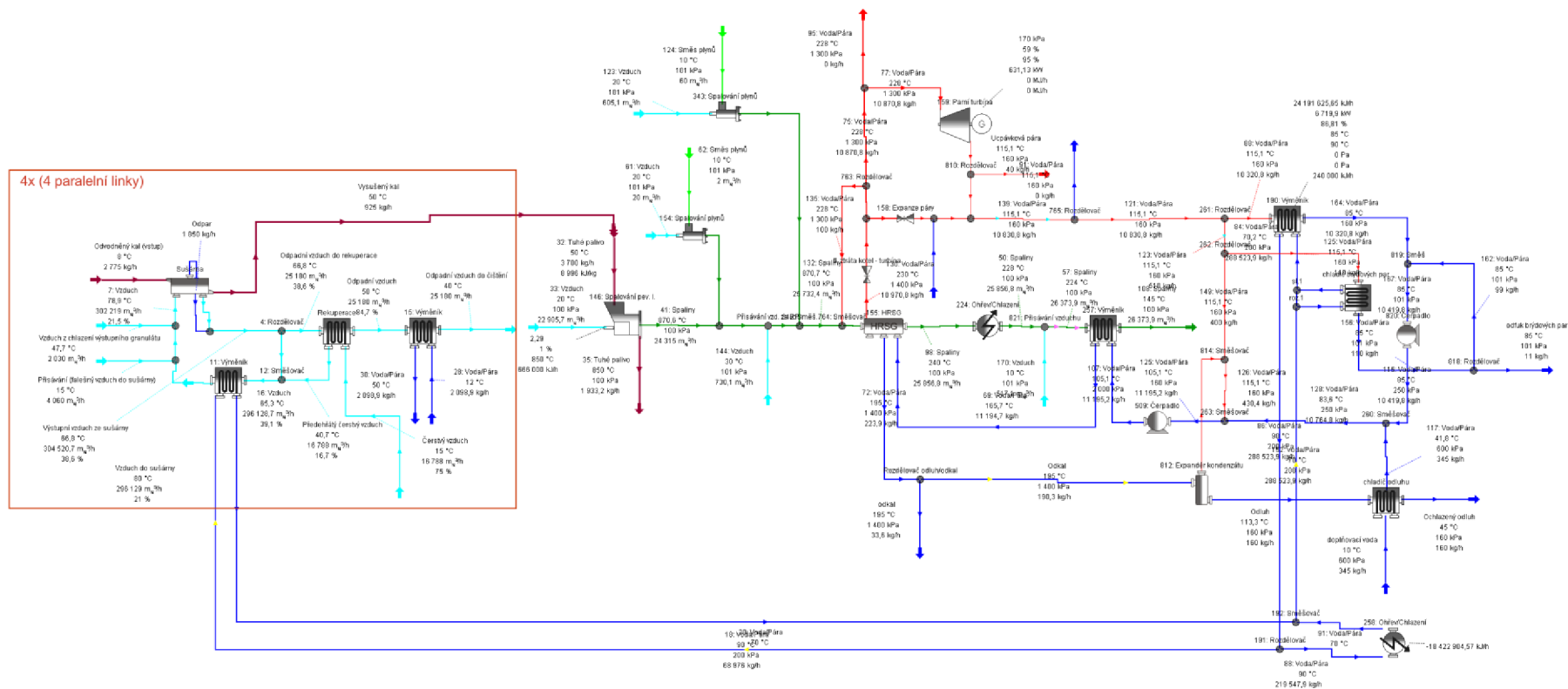
Tolerance spotřeby paliva +5%

Tolerance pro tepelný výkon +/- 8%

Priloha 6: Technologické vypočetní schéma pro kapacitu 100 tis. EO



# Příloha 7: Technologické výpočetní schéma pro kapacity 1 mil. EO



Příloha 7: Technologické výpočetní schéma pro kapacity 1 mil. EO

## Seznam příloh 8-12:

- Příloha 8: Výsledná bilanční schémata procesu sušení
- Příloha 9: Sankey diagramy pro jednotlivé varianty
- Příloha 10: Technologické schéma odvodnění a termického zpracování kalů pomocí pyrolýzní jednotky pro kap. 100 tis. EO
- Příloha 11: Technologické schéma odvodnění a termického zpracování kalů pro kap. 1 mil. EO
- Příloha 12: Rozměrový výkres provozního souboru PS01 pro kap. 1 mil. EO