

Materiálová transformace čistírenského kalu z energetického hlediska

Ing. Lukáš Frýba

ARKO TECHNOLOGY, a.s., Videňská 108, 619 00 Brno

Ing. Miroslav Kos, CSc., MBA

SMP CZ, a.s., Pobřežní 667/78, 186 00 Praha 8

1. Úvod

Nová legislativa EU i jednotlivých členských států v poslední době razantně reaguje na nové poznatky o složení kalů. Tyto skutečnosti spolu s ekonomickými důvody podnítily rozvoj a uplatnění moderních procesů anaerobní stabilizace kalů nebo doplnění existujících kalových linek ČOV o nové procesy zpracovatelské linky. Kombinuje se využití energie z čistírenských kalů s jejich materiálovou transformací do formy opět využitelné jako hnojivo nebo se zájmem na získání fosforu jako výhledově kritického materiálu EU.

Anaerobní stabilizace vyhníváním, termická hydrolyza, nízkoteplotní sušení a pyrolýza patří k nejslibnějším procesům, které se používají při přeměně čistírenských kalů na energii a hnojivo.

Anaerobní zpracování kalů z čistíren odpadních vod vytváří kalový plyn (bioplyn) bohatý na metan, který je obvykle využíván v kogeneračních zařízeních k pokrytí spotřeby tepla při ohřevu metanizačních nádrží a výrobě elektrické energie. Anaerobní stabilizace kalů je soubor navazujících biologických procesů, které však mají omezení z hlediska účinnosti, protože nezvládají dostatečně extrahovat energii z čistírenských kalů. Vyhnílý kal stále obsahuje značný organický podíl v sušině, který je ale obtížně biologicky rozložitelný.

Aby byla využita i tato obtížně biologicky využitelná část vyhnílého kalu, aplikují se postupně různé procesy k posílení anaerobního rozkladu organické hmoty nebo procesy úpravy kalu a následné energetické přeměny. Z provedených šetření se jeví, že existují různé kombinace anaerobního mezofilního nebo termofilního rozkladu s dalšími procesy, které umožní dosáhnout vyšší energetické účinnosti a současně zajistit materiálovou transformaci čistírenských kalů do formy dále využitelné jako zdroj.

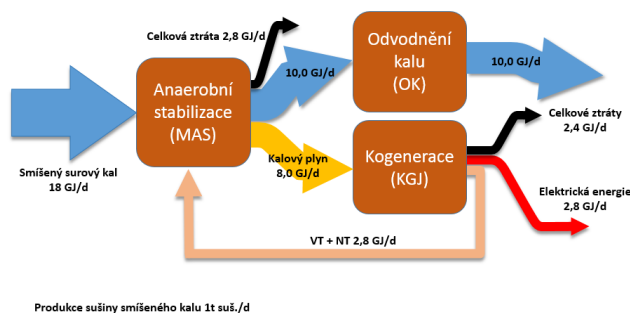
2. Základní procesy kalového hospodářství

Vyhnílý čistírenský kal byl a je používán jako hnojivo v mnoha oblastech po celém světě velmi dlouhou dobu. V poslední době se však na jeho přímé využívání aplikací na zemědělskou půdu mění. Důvodem jsou zásadní změny ve složení kalu, kdy změny v životním stylu obyvatelstva vedly k nárůstu obsahů mikropolutantů a dalších škodlivin v čistírenských kalech. Proto jsou připravovány a již i aplikovány nové přístupy k využití kalů v zemědělství. Současně se také sledují možnosti energetického využití čistírenských kalů, nebo ještě vhodněji kombinace obou přístupů ke zpracování kalů, aby hospodaření s kaly mohlo významně přispívat k oběhovému hospodářství. V Evropě vzniklo v roce 2014 cca 8,7 milionu tun sušiny kalu, to znamená přibližně 17 kg na obyvatele [1]. Na takto vyprodukovaný kal se můžeme dívat z energetického hlediska jako na zdroj s výhřevností cca 113.10⁶ GJ/rok nebo na zdroj hnojiva, např. 435 kt/rok P₂O₅, přičemž jeho hodnota při

zhodnocení obsahu dusíku a fosforu (cena dusíku je v současnosti cca 1 300 EUR za tunu a oxid fosforečný P_2O_5 má hodnotu 900 EUR za tunu) [2], při možné recyklaci cca 60 % je cca 600 milionů EUR ročně. Produkce kalu v ČR byla v roce 2016 173 700 t/rok, tj. $2,3 \cdot 10^6$ GJ/rok nebo např. 8,7 kt/rok P_2O_5 (hodnota cca 7,8 mil. EUR, 195 mil. Kč).

Tento stabilní zdroj energie, dusíku a fosforu by proto mohl být využit různými technologiemi. Na celé řadě lokalit je k získávání energie z kalů z čistíren odpadních vod použito anaerobní vyhnívání, nicméně vyhnílý kal má stále ještě energetický obsah, který by mohl být využíván po odstranění významného podílu vody několika dalšími postupy, jako je pyrolýza, zplyňování nebo hydrotermní karbonizace. I když je anaerobní vyhnívání kalu považováno za jeden z nejvíce technicky zralých a nákladově efektivních procesů, které přeměňují kal na bioplyn bohatý na metan, i tento proces je doplňován o další procesy, které zvyšují efektivnost produkce bioplynu z kalu [3]. Cílem práce je posoudit několik procesů možného zpracování čistírenského kalu pro odhad využití v něm obsažené energie a dosažení formy dále využitelné buď jako hnojivo či materiálu využitelného pro získávání fosforu, současně radikálně zredukovat produkovanou hmotnost na výstupu z technologické kalové linky. Provedli jsme srovnání několika v současnosti již využívaných procesů [4], které jsme kombinovali do různých logických sestav. Využili jsme přehled technologií pro termické zpracování kalu zpracovaný pracovní skupinou DWA [5], který byl součástí technologické přípravy na znění nové vyhlášky o čistírenských kalech, která byla schválena v roce 2017 (Neufassung der Klärschlammverordnung-AbfKlärV) [9]. Ta vyžaduje ve stanovených lhůtách předložit řešení a následně provádět na německých ČOV materiálovou transformaci kalu a povinně získávat fosfor. Začleněním termických a termochemických procesů do kalového hospodářství ČOV dostávají provozy kalového hospodářství zcela jiný charakter. V rámci rozvojových technologických prací posuzovány tyto kombinace:

- Konvenční mezofilní anaerobní stabilizace kalu (MAS) a využití odvodněného kalu v zemědělství
- Termická hydrolýza kalu (THP) kombinovaná s mezofilním anaerobním vyhníváním kalu a vyžitím odvodněného kalu v zemědělství
- Termická hydrolýza kalu kombinovaná s mezofilním anaerobním vyhníváním kalu a nízkoteplotním sušením kalu (NTS) s využitím jako palivo monospalováním (MSK)
- Termická hydrolýza kalu kombinovaná s mezofilním anaerobním vyhníváním kalu a nízkoteplotním sušením kalu a pyrolýzou (PYRO) sušeného kalu produkující biochar
- Termická hydrolýza odvodněného kalu (PAD THP), případně kombinovaná se sušením a pyrolýzou kalu



Obr. 1 Bilanční energetické schéma mezofilní anaerobní stabilizace kalu (MAS) s kogenerací (KGJ)

Přehled posuzovaných variant uvádí Tab. 1. Vhodnost posuzovaných variant je pochopitelně závislá na velikosti ČOV, tento faktor jsme při energetickém pohledu nezohledňovali, nicméně je logické, že technologie jsou převážně použitelné pro střední a velké ČOV. Pro každou technologii jsme zpracovali hmotové a energetické bilance a ty byly následně využity pro hodnocení variant. Protože řada technologií ještě není v ČR používána, využili jsme přímých kontaktů s významnými dodavateli k používání provozně ověřených skutečností a návrhových postupů. Ojedinele se tyto technologie vyskytují i v ČR, provozně je to nízkoteplotní sušení a monospalování kalu, jako pilotní jednotky provozní velikosti pak pyrolýza.

Tab. 1 – Přehled hodnocených variant technologií kalového hospodářství

Var.č.	Typ technologie kalového hospodářství								
	MAS	TAS	KGJ	NTS	THP FULL	THP WAS	PAD THP	PYRO	MSK
1	+		+						
2	+		+	+					
3	+		+		+				
4	+		+			+			
5	+		+	+		+			
6	+		+	+		+		+	
7	+		+	+				+	
8	+		+	+					+
9		+	+						
10		+	+				+		
11		+	+	+			+		
12		+	+	+			+	+	

Legenda k použitým zkratkám jednotlivých procesů:

MAS – mezofilní anaerobní stabilizace kalu

TAS – termofilní anaerobní stabilizace kalu

KGJ – kogenerační spalování kalového plynu s výrobou elektřiny a tepla

NTS – nízkoteplotní sušení kalu

THP FULL – termická hydrolýza smíšeného surového kalu

THP WAS – termická hydrolýza přebytečného kalu

PAD THP – termická hydrolýza odvodněného vyhnílého kalu

PYRO – pomalá pyrolýza sušeného kalu

MSK – monospalování sušeného kalu

3. Vývoj technologií kalového hospodářství ČOV

Rozvoj procesů kalového hospodářství, které jsou zaměřeny na získání energie a současně na materiálovou transformaci kalu, se v poslední době na středních a velkých ČOV ubírá směry, které lze shrnout takto:

- stále častější používání termické hydrolýzy (THP-Thermal Hydrolysis Process) v různých modifikacích, kdy je tento proces aplikován na kal před vyhnívacími nádržemi, případně mezi prvním a druhým stupněm vyhnívání, nebo pouze na přebytečný kal nebo na kal za vyhnívacími nádržemi, jako zdroj tepla pro THP je

využíváno odpadní teplo produkované kogeneračním zpracováním bioplynu (teplo ze spalínového výměníku, tzv. vysoké teplo)

- nízkoteplotní sušení (NTS) jako hygienizační stupeň v případě požadavku na zajištění pouze hygienizace, nebo jako předstupeň před dalším energetickým nebo materiálovým využitím
- monospalování kalu (MSK) se získáváním energie a využitím popele jako zdroje pro získávání fosforu, pouze pro větší ČOV nebo kalová centra
- termochemická transformace sušeného kalu se získáváním energie (pyrolýzní plyn, syngas) a získáváním biocharu s agrochemicky využitelným fosforem (využití jako hnojivo či hnojivá komponenta).

Vývoj a nasazení kombinací uvedených technologií v provozech velkých ČOV v zahraničí je skutečností posledních několika let. Současné pohledy na čistírenský kal produkovaný anaerobní stabilizací se již delší dobu zásadně mění a mají přímé technologické dopady na zpracování čistírenských kalů. Je to způsobeno novými zjištěními o negativním vývoji kvality kalů, které z tohoto důvodu musí být zpracovány tak, aby vyhověly novým požadavkům. Nové předpisy a ekonomické důvody podnítily doplnění existujících kalových linek ČOV o nové procesy zpracovatelské linky. Provozovatelé přitom současně usilují o vyšší ekonomiku provozu a vyšší výkon současných systémů představovaných většinou mezofilní anaerobní stabilizací. Samostatně kráčí některé technologie zaměřené pouze na získání fosforu, což není předmětem příspěvku.

4. Metodika zpracování energetických bilancí kalového hospodářství ČOV

Na základě údajů o výhřevnosti sušiny kalů, tepelné účinnosti jednotlivých zařízení a rekuperačních jednotek lze sestavit vedle hmotové bilance i bilanci tepelnou, kombinovanou s bilancí energetickou. Pro každou technologii máme vypracován samostatně návrhový algoritmus, který kombinuje hmotovou a energetickou bilanci. Touto prací navazujeme na již publikované práce o významu tepelných bilancí pro kalová hospodářství ČOV [6,7].

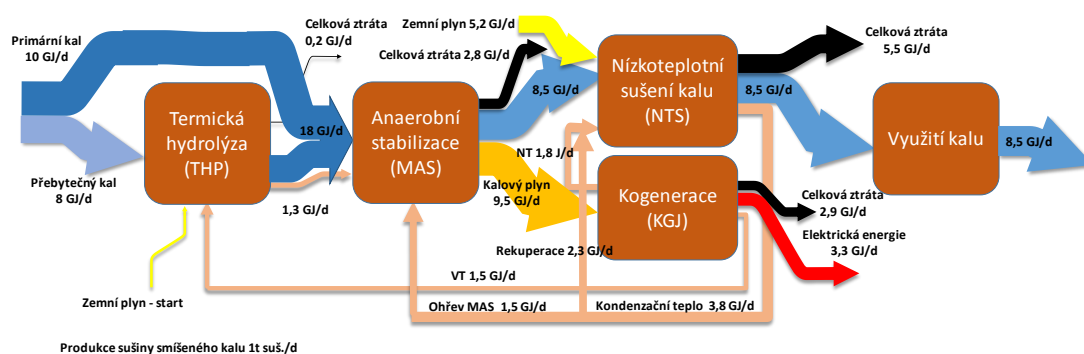
Rozhodli jsme se prezentovat výsledky propočtů pro případ jednotného hmotového vstupu smíšeného kalu 1000 kg sušiny/d, který má výhřevnost 18 MJ/kg. Bilancován je tedy vstup 18 GJ/d vstupující do anaerobní stabilizace kalu. Výpočty je sledována transformace tohoto energetického vstupu a jeho přeměna v průběhu zpracování. Zahrnuto je využití odpadního tepla z procesů, případně i nutnost použití externího zdroje tepelné energie. Protože jsou převážně bilancovány energetické obsahy v kalu, je použito jednotek GJ/d.

Získané bilance slouží především jako vstup do technickoekonomického hodnocení, které pak zahrnuje další nákladové a výnosové položky jako spotřebu elektrické energie, dopravní náklady, náklady na uložení produktu, emisní zatížení, výnosy z využití produktu, personální náklady, provozní náklady a investiční náklady. Samostatně je bilancována spotřeba elektrické energie. Pochopitelně je výstup z různých technologií různý: odvodněný kal, sušený kal (předpokládáno 90 % sušiny), mineralizovaný kal (biochar), popel ze spalování. Výstup je také různý z hlediska dosažení hygienizace kalu (podle Vyhlášky č. 437/2016 Sb.). Nemáme ambice sjednotit posouzení sestav na jednu základnu např. pomocí vah kritériální analýzy, to ponecháme technickoekonomickému posouzení. Bilance jsou zpracovány ve formě Sankey diagramů, prezentujeme jejich zjednodušenou formu. Cílem je kombinací procesů hledat optimální cesty pro získání energie a transformaci kalu.

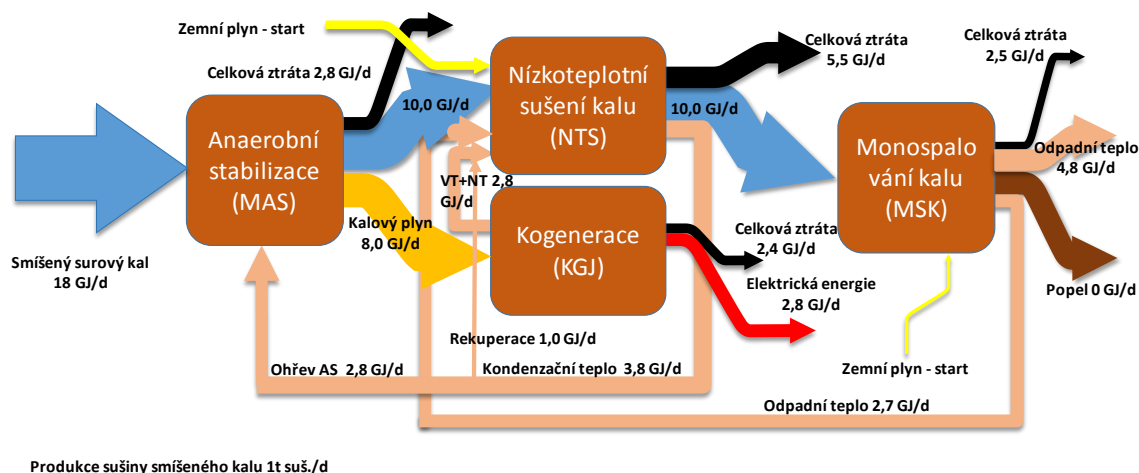
5. Poznámky k některým sestavám kalového hospodářství ČOV

Termická hydrolýza a anaerobní stabilizace

Použití THP v kterémkoliv uspořádání v kombinaci s anaerobní stabilizací kalu zlepšuje efektivnost využití energetického obsahu kalů ve srovnání s klasickou MAS a TAS. Předodvodnění před THP je nezbytné z důvodu redukce ohřivaného množství kalu. Finálně pak použití THP zvyšuje produkci bioplynu a následně pak i produkci elektrické energie a tepla. K výrobě páry pro THP postačuje teplo ze spalínového výměníku kogenerace, které je tak velmi efektivně využito, přičemž pouze varianta THP FULL vyžaduje dodatečný externí zdroj tepla. THP WAS si vystačí s teplem z kogenerace, na Obr.2 je znázorněna sestava s THP WAS pro nové kalové hospodářství ČOV Brno. Vyšším rozkladem se pochopitelně snižuje množství sušiny zpracovávané navazujícími procesy. S vyšším rozkladem biomasy kalu je spojena produkce kalové vody s vyššími koncentrací CHSK a dusíku, kterou je vhodné zpracovat v některém procesu typu Sidestream technologií [8]. Jedním z vhodných řešení je např. nitritace kalové vody a její následná denitritace spolu s denitrifikací v hlavní vodní lince. Proces bude např. použit v novém kalovém hospodářství ČOV Vídeň. Nejvyšší efektivností získání energie z kalu kombinací THP a MAS v současnosti dosahuje proces označovaný jako PAD THP – termická hydrolýza odvodněného vyhnílého kalu (Post-Anaerobic Digestion Thermal Hydrolysis Process).



Obr. 2 Bilanční energetické schéma pro sestavu s termickou hydrolýzou přebytečného kalu (THP-WAS), sušením kalu (NTS) a kogenerací (KGJ)



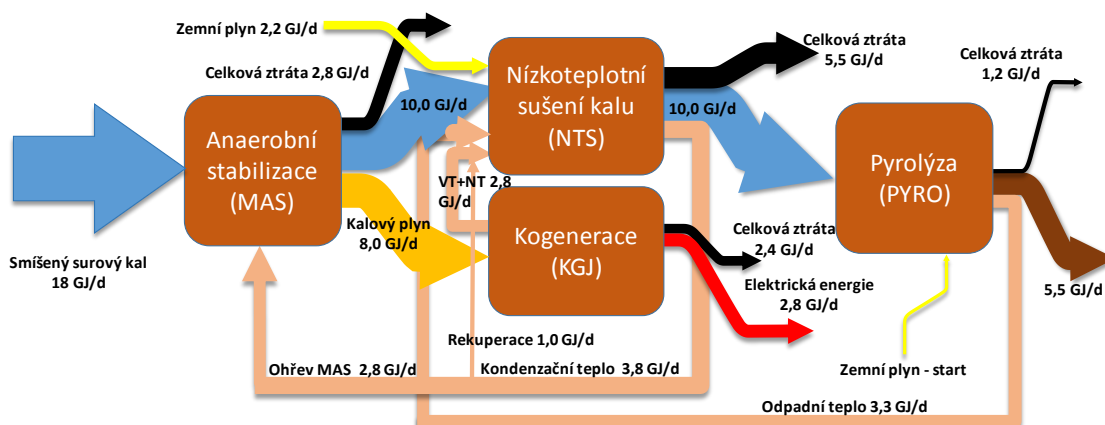
Obr. 3 Bilanční energetické schéma pro sestavu s mezofilní anaerobní stabilizací (MAS), nízkoteplotním sušením (NTS), kogenerací (KGJ) a spalováním kalu (MSK)

Sušení kalu

Sušení kalu zaujímá ve využití energie kalu po anaerobní stabilizaci výjimečné postavení. Na jedné straně odstranění vody z odvodněného kalu umožňuje přístup ke stále značnému energetickému obsahu kalu, na druhé straně je to energeticky nejnáročnější proces při transformaci kalu na palivo. Energetické bilance termické likvidace kalu prokazují, že čím více se odstraní vody z kalu před jeho např. spalováním, tím jsou energetické ztráty, ale i investice do monospalování nižší. Moderní nízkoteplotní sušárny dosahují specifického výkonu cca 0,85 až 0,9 kWh na 1 kg odpařené vody. To, že mohou využívat odpadní teplo ve formě teplé vody z kogeneračních jednotek a z pyrolýzních nebo spalovacích zařízení, dělá z nich logickou součástí linek transformace čistírenského kalu. Nicméně je skutečností, že pouze v případě spalování kalu odpadní teplo pokrývá spotřebu nízkoteplotní sušárny, zatímco v ostatních případech je nutné část (závisí na úrovni odvodnění kalu) spotřeby sušárny pokrývat externím teplem. Z nízkoteplotních sušáren lze získávat teplo z kondenzační části např. pro vytápění zařízení na ČOV (vyhřívací nádrže, budovy).

Pyrolýza, zplyňování a spalování kalu

Jako další stupeň zpracování sušeného kalu jsme do sestavy kalové linky zahrnuli pyrolýzu kalu. Tato termochemická transformace kalu se získáváním energie ve formě pyrolýzního plynu předpokládá, že pyrolýzní plyn je zařízením spotřebováván k ohřevu pyrolýzéro s produkcí odpadního tepla, které je využíváno k sušení kalu v nízkoteplotní sušárně. Produktem je pak biochar s agrochemicky využitelným fosforem (využití jako hnojivo či hnojivá komponenta). Tato zařízení jsou vhodná pro střední ČOV, pro větší ČOV nebo kalová centra je pak uvažováno s kombinací pyrolýzy a zplyňování kalu (procesy SÜLZLE KOPF SynGas a EuPhoRe). Protože však doposud nebylo dosaženo většího provozního využití, tak jsme zatím zplyňování nezahrnuli do posuzovaných variant. Pro velké kapacity je pak řešením monospalování kalu s výhledovým získáváním P z popela po spalování. Nevýhodou monospalování je výhradní produkce tepelné energie, zatímco zplyňování vede k produkci elektrické energie a má nižší ekologické dopady. Sestava na Obr.4 je navrhována pro celou řadu českých ČOV, neboť logicky navazuje na stávající sestavu kalového hospodářství. Lze ji členit do dvou kroků, nejprve pouze dostavba NTS (zajištění hygienizace), v druhém kroku pak doplnění o využití energie kalu a produkce biocharu.



Produkce sušiny smíšeného kalu 1t suš./d

Obr. 4 Bilanční energetické schéma pro sestavu s mezofilní anaerobní stabilizací (MAS), nízkoteplotním sušením (NTS), kogenerací (KGJ) a pyrolýzou kalu (PYRO)

6. Vyhodnocení porovnávaných sestav kalového hospodářství ČOV

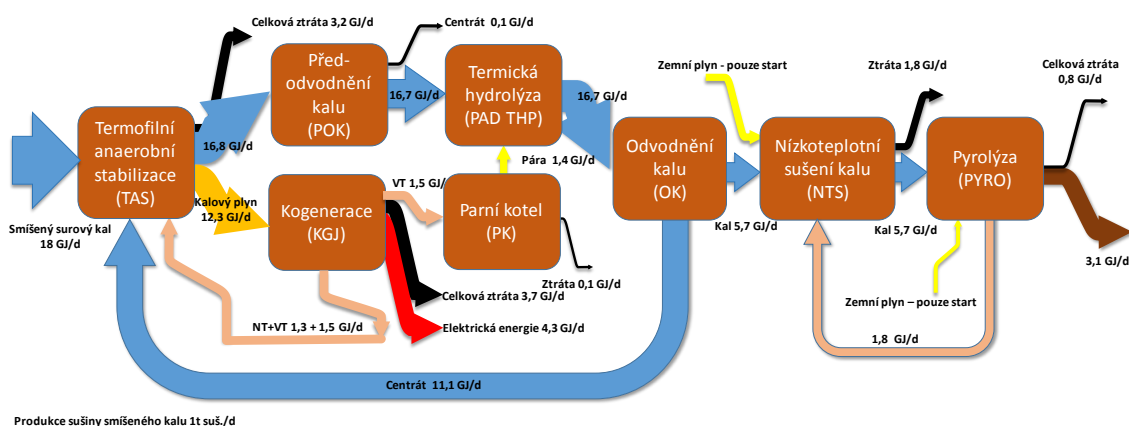
Pro varianty sestav v Tab. 1 jsme podle výše uvedené metodiky provedli bilanční výpočty transformace energetického obsahu kalu pro tok sušiny kalu 1 000 kg za den. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 – Vyhodnocení sestav kalového hospodářství ČOV z energetického hlediska

Var. č.	Energie v kalu na vstupu do kalového hospodářství	Energie v produkovaném bioplynu	Výroba elektrické energie	Energie v kalu na výstupu	Celková ztráta	Spotřeba externí energie	Bilance energie (vstup - výstup)	Celková bilance energie (vstup - výstup - externí)	Množství kalu		Forma výstupu (kal)	Hygienizace kalu		
									výstup	výstup sušina				
GJ/d											kg/d		-	-
1	18,0	8,0	2,8	10,0	5,2	0,0	8,0	8,0	2 600	650	odvodněný	ne		
2	18,0	8,0	2,8	10,0	5,2	5,5	8,0	2,5	722	650	sušený	ano		
3	18,0	10,5	3,7	7,5	6,8	0,3	10,5	10,2	1 833	550	odvodněný	ano		
4	18,0	9,5	3,3	8,5	6,2	0,0	9,5	9,5	2 071	580	odvodněný	ne		
5	18,0	9,5	3,3	8,5	6,2	5,2	9,5	4,3	644	580	sušený	ano		
6	18,0	9,5	3,3	5,0	9,7	2,6	13,0	10,4	474	450	mineralizovaný	ano		
7	18,0	8,0	2,8	5,5	9,7	2,2	12,5	10,3	474	450	mineralizovaný	ano		
8	18,0	8,0	2,8	4,8	10,4	0,0	13,2	13,2	439	430	popel	ano		
9	18,0	9,0	3,2	8,0	6,8	0,0	10,0	10,0	2 400	600	odvodněný	ne		
10	18,0	12,3	4,3	5,7	8,0	0,0	12,3	12,3	1 250	500	odvodněný	ano		
11	18,0	12,3	4,3	5,7	8,0	1,7	12,3	10,6	560	500	sušený	ano		
12	18,0	12,3	4,3	3,1	10,6	0,0	14,9	14,9	474	450	mineralizovaný	ano		

Z hlediska kalu je logické, že energie v kalu vystupujícím ze sestav kalového hospodářství, je nejvyšší v případě odvodněného kalu, v případě sestavy pouze s MAS je to 10 GJ/d. Pokud je nasazena termická hydrolýza, pak se výstup v odvodněném kalu snižuje, a to až na 5,7 GJ/d v případě PAD-THP. Dalším kvalitativně vyšším stupněm výstupu z technologie je dosažení sušeného kalu. Vyhodnocení ukazuje, jak je sušení náročné, což je zřetelné na ukazateli Spotřeba externí energie. Z hodnoty 5,5 GJ/d pro případ sestavy MAS+KGJ+NTS (var.2) je však možné spotřebu externí energie významně snížit pomocí THP, až na 1,7 GJ/d v případě varianty 11.

Z vyhodnocení je rovněž vidět, že nejvyšší výtěžnosti energie kalu z posuzovaných variant dosahuje varianta 12 (TAS+KGJ+NTS+PAD-THP+PYRO), která nevyžaduje externí dodávku tepelné energie a současně produkuje nejvyšší výnos v elektrické energii. Zároveň však má nejvyšší celkovou ztrátu, a to díky použití 2 termických procesů.



Obr. 5 Bilanční energetické schéma pro sestavu s termofilní anaerobní stabilizací (TAS), hydrolýzou vyhnílého kalu (PAD-THP), sušením kalu (NTS), kogenerací (KGJ) a pyrolýzou (PYRO)

8. Literatura

1. 9. zpráva o stavu provádění a o programech provádění (podle článku 17) směrnice Rady 91/271/EHS o čištění městských odpadních vod, COM (2017) 749 final, Brusel, 14.12.2017, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2017:749:FIN>
2. Qu'est-ce qu'une boue? SEDE Benelux, dostupné na <http://www.sede.be/fr/produits/recyclage-agricole/boue/>
3. Gandiglio M., Lanzini A., Soto A., Leone P. and Santarelli M. (2017) Enhancing the Energy Efficiency of Wastewater Treatment Plants through Co-digestion and Fuel Cell Systems. *Front. Environ. Sci.* 5:70., <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00070>
4. Mills, N. (2016) Unlocking the Full Energy Potential of Sewage Sludge, Doctor of Engineering Thesis, University of Surrey / Thames Water
5. Verfahren und Trends in der Thermischen Klärschlammbehandlung – Teil 1, Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1-4 “Neue Technologien zur Schlammbehandlung”, Korrespondenz Abwasser, Abfall, Nr.7, 2016
6. Kos, M. (2016) Tepelná bilance termochemického zpracování anaerobně stabilizovaného kalu, 9. konference s mezinárodní účastí Odpadové vody 2016, Štrbské Pleso, 19. -21. Október 2016
7. Kos M. (2017) Mezofilní anaerobní stabilizace – jak dále? Sborník přednášek ze semináře 22. ročníku odborného semináře „Nové metody a postupy při provozování ČOV“, s. 24–33, VHOS a.s., Moravská Třebová, 4. – 5. 4. 2017
8. Reducing nutrients in the San Francisco Bay through additional wastewater treatment plant sidestream treatment, EPA Sidestream Nutrient Removal Study (2017) Grant No. 99T07401, Funding Opportunity No. EPA-R9-WTR3-13-001, Grant No. 99T07401, Final Report, April 28, 2017
9. Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27. September 2017, dostupné na http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/wasser-abfallwirtschaft-download/artikel/klaerschlammverordnung-abfklaerv/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=608
10. Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien, Dezember 2017, ISBN.: 978-3-903129-32-0, <https://www.bmnt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/bundes-abfallwirtschaftsplan/BAWP2017-Final.html>