

HOSPODAŘENÍ S ČISTÍRENSKÝMI KALY JAKO PŘÍSPĚVEK K DOSAŽENÍ CÍLŮ UHLÍKOVĚ NEUTRALITY

Kos M.

SMP CZ, a.s., Vyskočilova 1566, 140 00 Praha 4
email: kos@smp.cz

ABSTRAKT

ČOV jsou velkým producentem skleníkových plynů, jejich uhlíková stopa musí zásadně zredukována. Vedle optimalizace procesu odstraňování dusíku je další možností využití energie v kalech, neboť biogenní uhlík kalů je považován za uhlíkově neutrální, lze ho využít pro kompenzaci uhlíkové stopy ČOV. Čistírenský kal skýtá velký potenciál znovuzískávání energie a hmoty, proto bude mít velký environmentální význam pro naplnění strategie přizpůsobení se změně klimatu, kal bude zdrojem, ne odpadem. Příspěvek se zabývá nastavením koncepcí pro zpracování kalů k dosažení uhlíkové neutrality.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kal; kalové hospodářství; oběhové hospodářství; technologie využití kalů, uhlíková neutralita

1. ÚVOD

Evropská komise přijala na počátku roku 2021 novou strategii Evropské unie pro přizpůsobení se změně klimatu. Nová strategie stanovuje, jak se EU může přizpůsobit nevyhnutelným dopadům změny klimatu a stát se odolnou vůči změně klimatu do roku 2050 (EC, 2021). European Climate Law (EC, 2020) v článku 2 určuje, že cíl se vztahuje na všechna odvětví a všechny skleníkové plyny (GHG), nejen na CO₂. Strategie má čtyři hlavní cíle: učinit adaptaci chytřejší, rychlejší, systematičtější a zintenzivnit mezinárodní opatření. K dosažení tohoto cíle jsou obvykle implementovány „4R“ (reduction, reuse, recycle, a recovery). Abychom cílů dosáhli, musíme ke 4R ještě přidat páté R, zcela zásadní, a to přehodnocení (rethink) používaných procesů. ČR řeší povinnost zpracování do národní legislativy vydáním Strategického rámce cirkulární ekonomiky České republiky 2040 (MŽP 2021).

K naplnění ambiciózního cíle dosáhnout uhlíkové neutrality EU do roku 2050, musí i odvětví vodního hospodářství sehrát významnou roli, zvláště pak čistírny odpadních vod (ČOV), které jsou významným přímým producentem skleníkových plynů (CO₂, CH₄, N₂O), ale také velkým nepřímým producentem jako spotřebitel elektrické a tepelné energie. Uhlíková stopa (CF) ČOV proto musí být nedílnou součástí všech plánů budoucího rozvoje a řešení. Je vypracována řada modelů výpočtu CF pro ČOV, které zahrnují čištění odpadních vod, zpracování a likvidaci kalů. Emise GHG se rozeznávají přímé, nepřímé a vyloučené emise. Mezi přímé emise se zahrnují CH₄ a N₂O emitované z procesů využívaných na ČOV, dále pak úniky CH₄ z anaerobního zpracování kalů (úniky z nádrží, a především z odvodnění kalů), emise CH₄ z uskladněného kalu, emise N₂O ze spalování kalu a emise CH₄ a N₂O z aplikace kalů na půdu nebo kompostování. Protokol IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) stanovil, že uhlík v odpadních vodách je biogenní, a tudíž emise CO₂ z odstraňování (oxidace) organických látek jsou považovány za uhlíkově neutrální a jsou z hodnocení CF vyloučeny (IPCC, 2006). Uhlík zachycený v primárním kalu nebo zabudovaný do aktivovaného kalu je rovněž považován za biogenní. Klíčovým GHG produkovaným aktivačním procesem je N₂O, produkovaný při denitrifikačních procesech, proto cílem bude pomocí optimalizace procesu odstraňování dusíku snížit jeho produkci. Nepřímé emise se vztahují na CO₂ emitovaný při výrobě energie a chemikálií spotřebovaných během provozu ČOV. Vyloučené emise skleníkových plynů se

připisují substituci materiálů, jako je např. výroba hnojiv, které se zabrání při aplikaci kalu na půdu, substituci obnovitelné energie (využití elektrické a tepelné energie získané z bioplynu nebo ze spalování kalu).

Je tedy logické, že máme-li přispět na ČOV k přibližování se uhlíkové neutralitě v duchu platné metodiky, bude nezbytné se zaměřit především snížení spotřeby elektrické energie a produkce GHG. Čistění odpadních vod produkuje převážně nepřímé emise, což souvisí s vysokou energetickou náročností aktivačního procesu i kalového hospodářství.

2. UHLÍKOVÁ STOPA – STRUČNÁ METODIKA

Emise CO₂ mohou pocházet buď z fosilního, nebo biogenního původu. Biogenní emise CO₂ patří do tzv. krátkého uhlíkového cyklu. Podílejí se na fotosyntéze nebo tepelných nebo biologických způsobech oxidace, takže emitovaný biogenní CO₂ je rychle začleněn do uhlíkového cyklu. Tyto biogenní emise nejsou v národních protokolech brány v úvahu, protože jsou (podle konvence) považovány za „uhlíkově neutrální“. Protože fosilní emise CO₂ pocházejí ze spalování uhlovodíků, které byly uloženy na Zemi před miliony let, patří do dlouhého uhlíkového cyklu. Potenciál globálního oteplování (GWP) je relativní měřítko toho, kolik tepla zachycuje GHG v atmosféře během určitého časového intervalu, obvykle za 100 let. Množství každého plynu se poté převede na emisní faktor vyjádřený jako ekvivalent CO₂ (CO₂eq) podle jejich potenciálu globálního oteplování (GWP). Uvažované plyny pro procesy čistění odpadních vod a jejich GWP jsou uvedeny v tabulce 1. Existuje celá řada metodik výpočtu uhlíkové stopy, ale obvykle se berou v úvahu tři typy emisí: přímé, nepřímé a emise, jejichž vzniku bylo zabráněno (vyloučené emise). Přímé emise jsou emise přímo produkované procesem nebo posuzovanou činností (např. emise CO₂ v důsledku spalování fosilního paliva). Nepřímé emise jsou produkovány procesy nezbytnými k zajištění aktivity nebo procesu, ale nejsou přímo generovány procesem (např. emise CO₂ během přepravy kalu, spotřeba elektrické energie). Pokud se produkty (média) nepoužívají a jsou nahrazeny recyklovatelnými produkty či výrobky (teplo, elektřina, hnojivo...), generují se pro výpočet CF emise, kterým bylo zabráněno vzniknout.

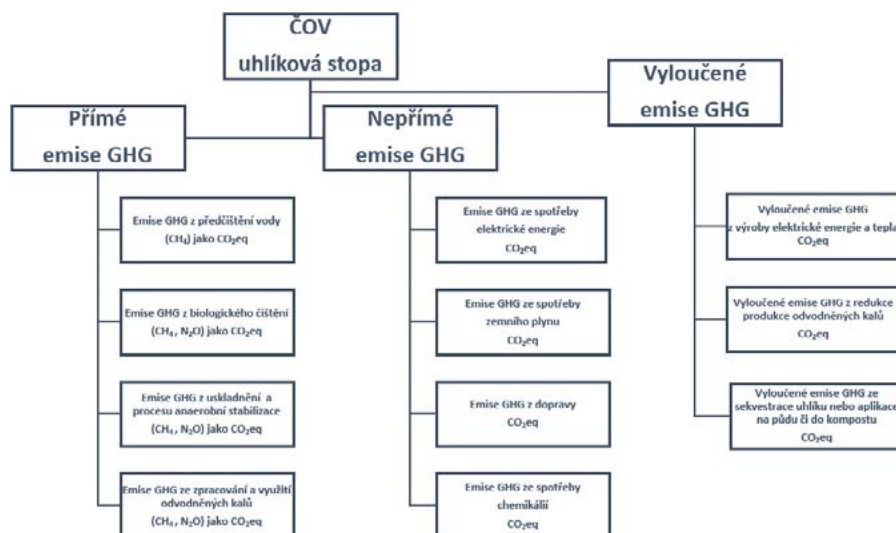
Tab. 1. GHG plyny související s provozem ČOV a jejich GWP za 100 let (IPCC, 2006)

Plyn (GHG)	Vzorec	GWP za 100 let
Oxid uhličitý	CO ₂	1
Methan	CH ₄	25
Oxid dusný	N ₂ O	298

3. KALY A UHLÍKOVÁ STOPA

Kalové hospodářství ČOV je velmi specifickou činností, na kterou se při přechodu ČOV na oběhové hospodářství soustřeďuje větší zájem než na optimalizaci vodní linky, která na většině ČOV de facto již proběhla. Zpracování kalu na ČOV zahrnuje vysoce energeticky náročné procesy, které představují přibližně 40 % emisí GHG z ČOV (Gherghel a kol., 2019) a 50 % ročních provozních nákladů na ČOV (Kacprzak a kol. 2017). Hnací silou využití kalů ke snížení CF pomocí vyloučení emisí je skutečnost, že uhlík v kalech je považován za biogenní, obnovitelný. Je tedy logické se orientovat na využití energie obsažené v kalech k výrobě energie a tepla a zároveň redukovat emise metanu a oxidu dusného.

V kalovém hospodářství za účelem kompenzace uhlíkové stopy budou využitelná řešení s nízkou uhlíkovou stopou, a to jak přímou či nepřímou, ale především „vyloučené“ emise. Čistírenský kal z hlediska udržitelného oběhového hospodářství skýtá velký potenciál znovuzískávání energie a hmoty, proto bude mít velký ekonomický a environmentální význam z hlediska naplnění strategie přizpůsobení se změně klimatu. Čistírenský kal bude spíše obnovitelným zdrojem než odpadem.



Obř. 1. Uhlíková stopa ČOV a zpracování kalů – rozdělení druhů emisí GHG

Čistírenské kaly jsou vedlejšími produkty čištění odpadních vod. Sušina čistírenského kalu obsahuje v odvodněném stavu 50–70 % organické hmoty, 30–50 % minerálních složek, 3–4 % dusíku (N), 0,25–0,5 % fosforu (P) a významná množství dalších užitečných látek. Navíc fosfor, který lze získat úpravou čistírenského kalu, je klasifikován jako kritická surovina, která se podle odhadů vyčerpá v příštích 50–100 letech. Energetický potenciál kalu představuje specifická produkce kalového plynu na 1 kg organických látek přivedených do vyhnívací nádrže cca 0,48 m³/kg org. suš. (cca 20 až 25 l/EO₁₂₀.d) a výhřevnost sušiny kalu po anaerobní stabilizaci cca 10–12 MJ/kg. suš. (Kos, 2021). ČOV jsou velkým spotřebitelem elektrické a tepelné energie, proto produkce energií z kalů může být bez problémů využita přímo na ČOV, a tak významně může redukovat nepřímé emise GHG. Využit lze termickou oxidací nebo termochemické procesy, které poskytují tepelnou energii, která může být využita např. k sušení kalů.

Na druhé straně kal také obsahuje vysoce nebezpečné kontaminanty, organické i anorganické, a patogeny. Přehodnocení hodnotového řetězce čištění odpadních vod znamená podporu přechodu od tradičního konceptu ČOV ke koncepci zařízení na využívání odpadních vod a kalů. V této souvislosti mezi hlavními environmentálními a ekonomickými cíli, které bude muset kalové hospodářství sledovat, lze uvést tyto cíle:

1. Přeměnit nežádoucí složky na méně nebezpečné látky nebo je zcela odstranit;
2. Získat energii/hmotu z čistírenského kalu do formy meziprojektu nebo finálního produktu a maximálně využít skutečnosti, že se jedná o biogenní uhlík;
3. Snížit nebo zcela odstranit vodu obsaženou v odvodněném kalu, což povede k nižším následným nákladům na zpracování, manipulaci a přepravu kalů ve srovnání se současností;

4. Použit technologie s nízkou spotřebou tepelné a elektrické energie, které je reálně možné využít jako příspěvek pro přizpůsobení se změně klimatu a pro dosažení uhlíkové neutrality.

4. JAKÁ JE BUDOUCNOST ZPRACOVÁNÍ KALŮ

V souvislosti s dosažením uhlíkové neutrality se logicky dostáváme k základní otázce: „Jaké jsou vhodné budoucí možnosti řešení kalů z ČOV s ohledem na zdroje a rizika a jejich důsledky pro lidské zdraví a životní prostředí, ekonomiku a vývoj a inovace technologií“? Nalezením odpovědi se v poslední době zabývá celá řada studií (Facchini a kol., 2021, Maktabifard a kol. 2020, Zhao a kol., 2021), ve kterých jsou porovnávány různé technologie.

Přibližně jedna třetina kalů se v ČR aplikuje přímo na půdu, další třetina pak přes komposty. V této souvislosti je zdůrazňován obsah organických látek, dusíku a fosforu jako přínos pro půdu. Z hlediska rizika však čistírenský kal také obsahuje nežádoucí látky, jako jsou těžké kovy (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn), nerozložitelné mikroplasty, patogeny, antibiotika a další antimikrobiální látky, nově vznikající skupiny chemických látek, jako jsou poly- a perfluoralkylové látky (PFAS), a látky vzbuzující obavy, které mohou při nesprávném nebo nebezpečném zacházení potenciálně poškodit lidské zdraví a životní prostředí. Navíc se při nakládání, zpracování a skladování odvodněných kalů uvolňuje do ovzduší metan a oxid dusný.

Nejistoty a neznáma týkající se povahy, charakteristik, osudu a dopadu nežádoucích látek v čistírenských kalech činí z manipulace a používání čistírenských kalů v zemědělství zvláště složitý a riskantní postup ze zdravotního i obchodního hlediska. Je proto logické, že vnímaná rizika s ohledem na nejistoty včetně potenciálních „koktejlových účinků“, při absenci vhodných metod nebo systémů pro monitorování a měření účinků, a při uplatnění přístupů předběžné opatrnosti vedou v celé řadě zemí EU k odmítání aplikace kalů na půdu. Je to situace, která přináší motivaci ke změně hospodaření s čistírenskými kaly, zvláště pokud se tak sníží uhlíková stopa ČOV. Revize a očekávané zpřísnění legislativy EU týkající se nakládání s čistírenským kalem budou představovat pro ČR nové výzvy. Zavedení přísnějších předpisů v oblasti využívání kalů z ČOV a lepší čištění odpadních vod zvýší úroveň problémů nakládání s kalem z ČOV. ČR stojí před výzvou definovat směry pro nakládání s kaly z ČOV, nicméně koncepce nakládání s čistírenskými kaly v ČR v této chvíli chybí. Koncept oběhového hospodářství nabízí přístupy, které mohou být základem pro vytvoření nové strategie nakládání s čistírenským kalem, a tak dosáhnout kombinovaných cílů zdraví neškodného odstraňování kalů, snižování uhlíkové stopy a opětovné získávání energie a živin.

Již v roce 2009 vydala EU (EC, 2009) doporučení, aby u všech vyhnívacích nádrží pro zpracování kalů byla zahrnuta technologie předúpravy kalů (hydrolýza), aby se snížila uhlíková stopa a maximalizovala výroba obnovitelné energie. Na základě podkladové studie (Barber, 2009) doporučení EU konstatuje, že jakákoli úprava kalu bez anaerobního rozkladu je ve většině případů jeví jako neudržitelná a z hlediska CF nevýhodná.

Technologie předúpravy kalů před anaerobním rozkladem, jako je např. tepelná hydrolýza, mohou zlepšit jak produkci bioplynu, tak odvodnění kalů. Vlastní energetická soběstačnost procesu je předpokladem, aby se aplikace v plném rozsahu staly neutrální pro energetickou bilanci a vedly ke snížení nepřímých emisí skleníkových plynů. Zplyňování, pyrolýza a torefakce při zpracování sušeného kalu mohou imobilizovat většinu kovů v procesním pevném zbytku

(biochar), nicméně jsou to teprve nastupující procesy. Jsou však navrhovány jako možnosti zpracování kalů zajišťující zpětné získávání uhlíku a živin, aby byla uspokojena koncepce udržitelnosti a oběhového hospodářství. Thermochemické technologie sice ještě vyžadují další vývoj, snižování nákladů a hodnocení s ohledem na celkový dopad na životní prostředí, ale řada z nich již překonala vývojové stadium a nasazuje se do praxe.

Před energetickým využitím kalů je potřebné dostat odvodněný kal do formy s nízkým obsahem vody. Tradiční postupy sušení kalů využívající obvykle zemní plyn k zajištění tepla pro odpaření vody jsou z hlediska uhlíkové stopy extrémně nevýhodné. Proto je snaha pro sušení využít teplo z následného energetického zpracování sušeného kalu, a tak snížit energetickou náročnost procesu sušení. Jiným, prudce nastupujícím trendem je solární sušení kalů, které se postupně posunuje z oblasti středních ČOV i do oblasti největších čistíren odpadních vod. I solární sušení se kombinuje s využitím odpadního tepla z energetického využití sušeného kalu.

5. PŘÍMÉ, NEPŘÍMÉ A VYLOUČENÉ EMISE PŘI PRACOVÁNÍ KALU Z HLEDISKA UHLÍKOVÉ STOPY

Dáme-li na první místo nezvyšování nebo dokonce snižování uhlíkové stopy čištění odpadních vod a zpracování vzniklých kalů, musíme si uvědomit, které jak jsou započítané GHG produkované v souvislosti s provozováním ČOV. Přehled specifických produkcí GHG v souvislosti s nakládáním s čistírenskými kaly (Pradel, 2012) uvádí tabulka 2.

Tab. 2. Přímé emise v souvislosti s čištěním odpadních vod a zpracováním kalů

Proces	Typ emise	Rozměr	Emisní faktor
Aktivační proces – oxidace CHSK	CO ₂ eq N ₂ O	kg/kg ΔCHSK	0,08
Statické zahušťování kalu – anaerobní podmínky	CH ₄	kg/t sušiny kalu	0,04
Uskladnění kalu	CH ₄	kg/kg BSK ₅	0,12-0,40
Anaerobní stabilizace kalu	CH ₄	kg/t sušiny kalu	0,18
Kompostování kalu	CH ₄ N ₂ O	kg/t kalu	2,9 0,4
Aplikace na půdu – zahuštěný tekutý kal	N ₂ O	kg/t kalu	0,029
Aplikace na půdu – vápněný kal	N ₂ O	kg/t kalu	0,05
Aplikace na půdu – kompostovaný kal	N ₂ O	kg/t kalu	0,05
Spalování bioplynu v kogenerační jednotce	CO ₂ eq (CH ₄ + N ₂ O)	kg/kWh _e	0,1-0,4
Spolu-spalování kalu	CO ₂ N ₂ O	kg/t sušiny kalu	390 0,092
Skládkování kalu bez zachycování plynu	CH ₄	Kg/t C	C*0,43

V této souvislosti je potřeba upozornit na dilema kompostování. Přesto, že je tento proces prezentován jako aerobní, celá řada naměřených údajů o produkci GHG při kompostování je zářející. Zřejmě nejsou dodržovány provozní podmínky, v první fázi založení kompostů s čistírenskými kaly je registrována silná produkce N₂O, průběžně pak obvykle roste produkce CH₄. Je zajímavé, že vermikompostování má vyšší CF než klasické kompostování.

Bioplyn a jeho energetické využití může významně přispět ke snížení emisí skleníkových plynů. Je však třeba věnovat pozornost nežádoucím emisím metanu a oxidu dusného, neboť při spalování bioplynu může dosázet k nedokonalému spálení CH₄ a vzniku N₂O (Paolini a kol.

2018). Porovnání uhlíkové stopy využití bioplynu v kogenerační jednotce a vyrobeného biometanu ukazuje, že využití v kogeneraci má nižší uhlíkovou stopu, kterou u biometanu zvyšuje především nepřímá produkce GHG vyplývající ze spotřeby elektrické energie při jeho výrobě (0,3-0,5 kWh/m³). Přejít na biomethan může obecně zlepšit kvalitu ovzduší a snížit emise skleníkových plynů (oproti naftě), ztráty metanu v odpadním plynu z výroby biometanu však mohou ovlivnit udržitelnost celého procesu. Studie JRC (Giuntoli a kol., 2017) odhaduje úspory skleníkových plynů ve srovnání s fosilními palivy v EU až 240 % pro kogenerační využití bioplynu a až 202 % pro využití biometanu, v závislosti na surovinách a použité technologii.

Klíčovou roli ve výpočtech CF hrají emisní faktory vyjádřené jako CO₂eq na jednotku spotřeby média nebo produktu. Vybrané údaje jsou uvedeny v tabulce 3. Je skutečností, že hodnoty se mohou významně lišit podle místa spotřeby. Např. u elektrické energie závisí na skutečném energetickém mixu v příslušném státě. Arnika (2021) např. uvádí pro elektrickou energii emisní faktor v Praze 0,541 kg CO₂eq /kWh_e, což je výše než uváděný průměr.

Tab. 3. Hodnoty emisních faktorů pro různé média v souvislosti se zpracováním kalů (Třebický, 2016, City of Winnipeg, 2021)

Druh vstupu do procesu	Typ emise	Rozměr	Emisní faktor
Elektrická energie	CO ₂ eq	kg/kWh _e	0,484
Zemní plyn	CO ₂ eq	kg/kWh _t	0,198
Tepelná energie (dálkové teplo)	CO ₂ eq	kg/kWh _t	0,232
Hnědé uhlí	CO ₂ eq	kg/kWh	0,40
Motorová nafta	CO ₂ eq	kg/l	2,79
Voda pitná veřejné sítě	CO ₂ eq	kg/m ³	0,38
Voda balená	CO ₂ eq	kg/m ³	120,0
Polymer	CO ₂ eq	kg/kg	4,25
FeCl ₃ (40 %)	CO ₂ eq	kg/kg	0,18
Vápnó	CO ₂ eq	kg/kg	1,04
Aktivní uhlí	CO ₂ eq	kg/kg	2,6 – 6,0

6. SEKVESTRACE UHLÍKU A CHYTRÉ ZPRACOVÁNÍ KALŮ POMOCÍ OBNOVITELNÉ ENERGIE – PŘÍKLAD ŘEŠENÍ

V poslední době se věnujeme hledání ověřených procesů, které mohou pomoci snížit CF ČOV, v oblasti zpracování kalů a likvidace odvodněného kalu. Scénářů je několik, ale v podstatě je lze rozdělit na procesy zvyšující produkci bioplynu a procesy zpracování odvodněného kalu do stabilní formy, a to tak, aby využití kalu mohlo přinést významné změny celkové CF. Jako příklady lze uvést projekt zaměřený na sekvestraci uhlíku a chytré zpracování kalů kombinující použití solárního sušení a pyrolýzy. Solární záření razantně vstoupí nejen do výroby elektrické energie, ale i do využití indukovaného tepla.

Zvolili jsme integrovaný přístup zahrnující zhodnocení biomasy kalů, s negativní CO₂ bilancí, který je založen na energeticky soběstačném řešení s minimální uhlíkovou stopou, zároveň respektující potřebu obnovy kvality půdy nebo vylepšení vlastností půdy, zajišťující úplné odstranění patogenních organismů a umožňují stabilní provoz a nakládání s kalem. Technologie je zakončena sekvestrací uhlíku, tedy jeho trvalé uložení, nebo zachycení do trvale stabilní formy uhlíku. Toto řešení minimalizuje nebo zcela zabraňuje atmosférickému CO₂ znečištění, a tak zmírňuje nebo mění globální oteplování na „ochlazování“ planety.

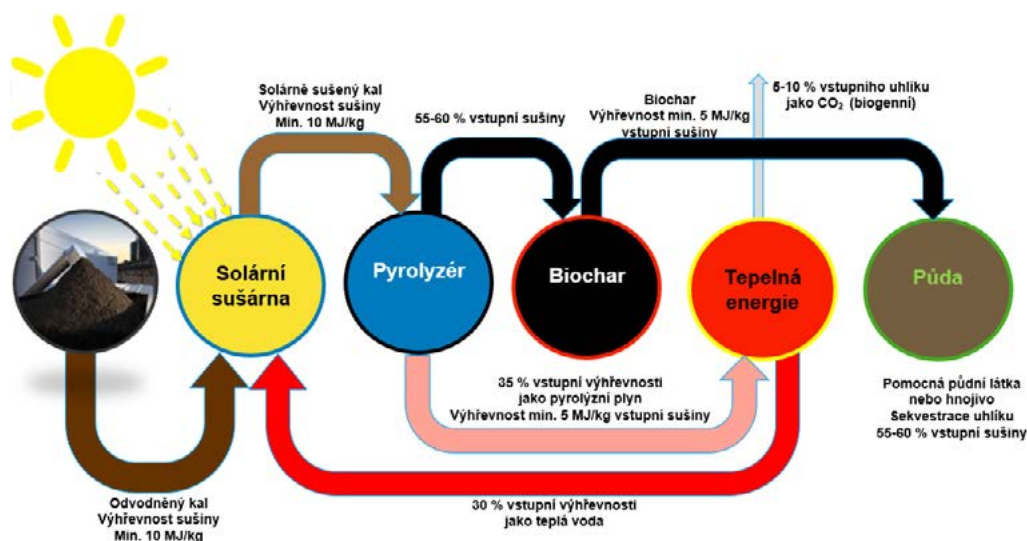
Navrhované řešení spočívá ve dvou technologických krocích:

- 1) Solární sušení odvodněného kalu s využitím odpadního tepla,
- 2) Pomalá pyrolýza solárně sušeného kalu.

Hlavní důvody kombinace těchto procesů:

- solární sušení – redukuje náklady na sušení kalu, přičemž umožňuje využití odpadního tepla z pyrolýzy k podpoře solárního sušení,
- pyrolýza je energeticky pozitivní proces, který navíc převádí uhlík obsažený v kalu na uhlík ve stabilní formě jako biochar, akumuluje v něm také deficitní fosfor, biochar má zároveň řadu pozitivních vlivů na půdu, teplo z pyrolýzního plynu zabezpečuje pyrolýzní proces a je také využitelné k podpoře solárního sušení. Biochar aplikovaný na půdu zajišťuje efektivní a dlouhodobé bezemisní uložení uhlíku.

Výsledek – více než 50 % uhlíku z kalu je přeměněno na stabilní formu biocharu při velmi nízké spotřebě elektrické energie, emise oproti využití v kompostu nebo na půdě jsou nulové. Uhlíková stopa spočívá ve spotřebě elektrické energie solární sušárnou a pyrolýzérem. Emisní faktor solární sušárny zpracovávající odvodněný kal z 20 % sušiny na cca 80 % sušiny vyplývá z energetické náročnosti cca 35 kWh_e/t odpařené vody, což je cca 0,013 kg CO₂eq/kg odvodněného kalu. Srovnáme-li solární sušení s nízkoteplotním sušením pro stejné parametry sušení a pro specifickou spotřebu elektrické energie 90 kWh_e/t odpařené vody a tepla cca 900 kWh_t/t odpařené vody, dospějeme u nízkoteplotní sušárny k emisnímu faktoru 0,157 kg CO₂eq/kg odvodněného kalu, který představuje cca 460 % hodnoty při solárním sušení.



Obr. 2. Uhlíkově negativní technologie pro čistírenské kal kombinující solární sušení a pyrolýzu s minimální uhlíkovou stopou

7. ZÁVĚRY

Anaerobní stabilizace kalů je rozeznávána jako účinná technologie ke snížení emisí skleníkových plynů, jakož i využití tepelné energie ze spalování sušených kalů. Zemědělské využití kalů je uvažováno využívat v regionech, kde kal obsahuje přijatelné množství znečišťujících látek (např. těžké kovy, perzistentní organické znečišťující látky). Upřednostňovanou metodou finálního zneškodňování budou termické technologie, protože

mají menší zábor půdy a emise skleníkových plynů. Společným směrem do budoucna je minimalizace využívání kalů v zemědělství a využívání kalů jako zdroje energie. Strategie rekuperace energie, jako je zlepšení účinnosti produkce bioplynu, vysoká účinnost zpětného získávání elektřiny a využití tepla, solární sušení a využití sušeného kalu jako paliva významně snižují emise skleníkových plynů kalového hospodářství ČOV.

SEZNAM LITERATURY

- Barber, W.P.F. (2009). Influence of anaerobic digestion on the carbon footprint of various sewage sludge treatment options. *Water and Environment Journal*. 23, 170-179.
- City of Winnipeg (2021) Emission factors in kg CO₂-equivalent per unit, https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix%207.pdf
- EBA (2020). The contribution of the biogas and biomethane industries to medium-term greenhouse gas reduction targets and climate-neutrality by 2050, Background paper, April 2020
- European Commission (2009). Reducing the carbon footprint of sewage sludge, DG ENV, https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/174na5_en.pdf
- European Commission (2020). European Climate Law COM/2020/80 final, 6.3.2020, COM(2020) 80 final (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0080&from=EN>)
- European Commission (2021). The new EU Strategy on Adaptation to Climate Change, 24.2.2021, COM(2021) 82 final (https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/adaptation/what/docs/eu_strategy_2021.pdf)
- Facchini F., Mummolo G., Vitti M. (2021). Scenario Analysis for Selecting Sewage Sludge-to-Energy/Matter Recovery Processes. *Energies* 2021, 14, 276.
- Gherghel A., Teodosiu C., de Gisi S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *J. Clean. Prod.* 2019, 228, 244–263.
- Giuntoli J., Agostini A., Edwards R., Marelli L. (2017) Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions. Calculated according to the methodology set in COM (2016) 767, EUR 27215 EN, doi:10.2790/27486.
- Havel M. (2021) Moje uhlíková stopa, ARNIKA, <https://arnika.org/moje-uhlikova-stopa>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006) 2006-04-28. <https://archive.ipcc.ch/pdf/ipcc-principles/ipcc-principles.pdf>
- Kacprzak M., Neczaj E., Fijałkowski K., Grobelak A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat A., Brattebo H., Almås A., Singh B.R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environ. Res.* 2017, 156, 39–46.
- Kos M. (2021). Energetické hodnocení kalového hospodářství českých ČOV, časopis SOVAK 2021, s. 4-10, ISSN 1210-3039
- Maktabifard M., Zaborowska E., Makinia J. (2020). Energy neutrality versus carbon footprint minimization in municipal wastewater treatment plants, *Bioresource Technology* 300 (2020) 122647, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122647>
- MŽP (2021). Strategický rámec cirkulární ekonomiky České republiky 2040, návrh květen 2021,
- Paolini V., Petracchini F., Segreto M., Tomassetti L, Naja N., Cecinato A. (2018). Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 53:10, 899-906, DOI: 10.1080/10934529.2018.1459076
- Pradel M., Reverdy A.L. (2012). Assessing GHG emissions from sludge treatment and disposal routes: the method behind GESTABoues tool. ORBIT2012, Global assessment for organic resources and waste management, Jun 2012, Rennes, France
- Třebický V. (2016) Metodika stanovení uhlíkové stopy podniku a postup pro její snížení, vydavatel CI2, o. p. s.
- Wzorek M. (2021). Solar drying of granulated waste blends for dry biofuel production, *Environmental Science and Pollution Research*, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12848-3>
- Zhao G., Liu W., Xu J., Huang X., Lin X., Huang J., Li G. (2021). Greenhouse Gas Emission Mitigation of Large-Scale Wastewater Treatment Plants (WWTPs): Optimization of Sludge Treatment and Disposal, *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 30, No. 1 (2021), 955-964