



Od odpadu ke zdroji – Recyklace popela z čistírenských kalů na rostlinné hnojivo bohaté na fosfáty

Jak lze fosfor obsažený v čistírenském kalu využít ke zlepšení završení jeho cyklu.



Motivace

Fosfor je nezbytným hnojivem v zemědělské produkci, ale jeho zásoby jsou omezené, geograficky soustředěné a těžba probíhá za nepříznivých podmínek. Od roku 2014 je fosfor na seznamu kritických surovin EU kvůli své důležitosti a vysoké závislosti na dovozu. Přibližně 90 % fosforu z odpadních vod je zachyceno v čistírenském kalu – což představuje téměř 7 000 tun ročně v Rakousku a 8 000 tun v České republice.

Způsob nakládání s čistírenským kalem se v obou zemích liší. V České republice stále převažuje jeho využití v zemědělství, zatímco v Rakousku se většina kalu spaluje; ve Vídni se uplatňuje tzv. mono-spalování. Do roku 2033 bude Rakousko kromě lokálních řešení vyžadovat povinné spalování pro větší čistírny odpadních vod, přičemž z popela bude nutné získat zpět 80 % fosforu. Česká republika plánuje zpřísnění legislativy, které omezí využití kalu v zemědělství, a směřuje tak k alternativním způsobům nakládání, přičemž hlavní variantou bude termické zpracování.

Získávání fosforu z popela čistírenského kalu je náročné kvůli přítomnosti těžkých kovů. Použití průmyslových kyselin k loužení a následné srážení činí celý proces ekonomicky i environmentálně problematickým. V projektu PHOS4PLANT se proto zkoumají alternativní způsoby spalování kalu, loužení a srážení fosforu, které by mohly představovat ekologicky šetrnou alternativu pro výrobu kvalitního hnojiva založeného na biologických procesech.

Současný stav výzkumu v rámci pracovního balíčku 3

Bioelektrochemická recuperace fosforu ve formě struvitu

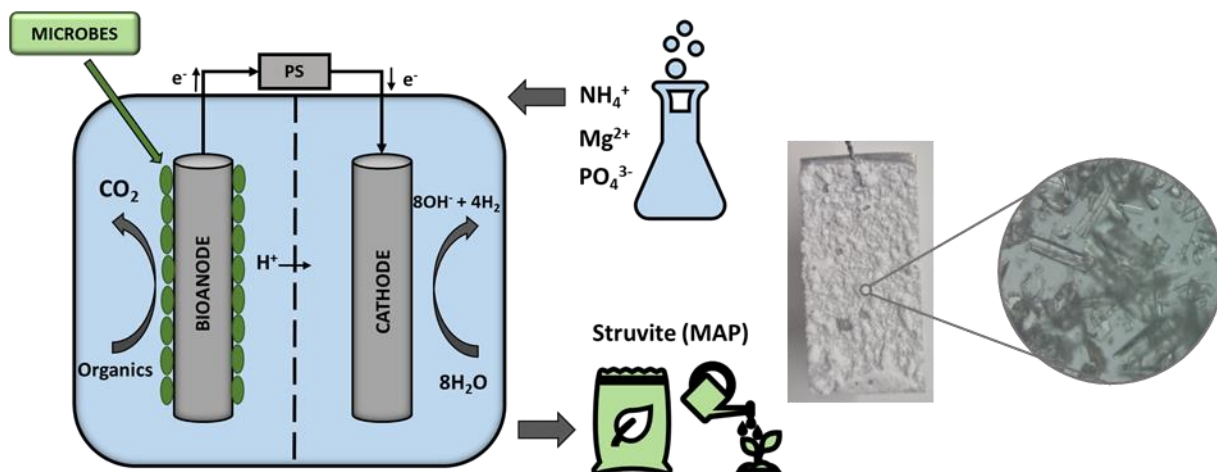
Po vyloužení fosforu z popela kalů pomocí biogenní kyseliny sírové je rozpuštěný fosfor následně získáván vysrážením ve formě struvitu.

Struvit (fosforečnan hořečnato-amonný) je cenné recyklované hnojivo a představuje důležitou cestu k udržitelnému získávání fosforu.

Precipitace-srážení probíhá za alkalických podmínek při pH přibližně 8–10 a obvykle je dosažena přidávkem zásad, jako je hydroxid sodný. V tomto projektu je jako alternativa ke konvenční chemické precipitaci zkoumán bioelektrochemický systém (viz Obr. 1).

Systém se skládá z bioanody a katody oddělených membránou. Na bioanodě je obohacena smíšená mikrobiální kultura pocházející z čistírenských kalů, která byla analyzována a charakterizována pomocí molekulárně biologických metod na Masarykově univerzitě (MU). Mikroorganismy jsou kontinuálně zásobovány syntetickou odpadní vodou jako substrátem, přičemž rozkládají organické látky na CO_2 . Při tomto procesu se uvolňují elektrony, které jsou prostřednictvím vnějšího obvodu přenášeny na katodu.

Na katodě dochází k redukci vody za vzniku vodíku (H_2) a hydroxidových iontů (OH^-). Tvorba hydroxidových iontů zvyšuje pH v katodovém prostoru a vytváří tak alkalické podmínky potřebné pro precipitaci struvitu. Za těchto podmínek reagují ionty amonného dusíku (NH_4^+), hořčíku (Mg^{2+}) a fosforečnanu (PO_4^{3-}) rozpuštěné v elektrolytu za vzniku struvitu. Vzniklé krystaly se buď usazují na povrchu katody (viz Obr. 1), nebo se tvoří v objemu roztoku.



Obr. 1. Schématické znázornění bioelektrochemického systému a tvorby struvitu na katodě včetně mikroskopického snímku precipitátu.

Vysrážený struvit je následně oddělen filtrací a jeho analytická charakterizace je prováděna pomocí rentgenové difrakce (XRD) na MU. Pro vyhodnocení účinnosti získávání fosforu, hořčíku a amonného dusíku je po odstranění struvitu analyzován katolyt na zbytkové koncentrace iontů pomocí fotometrických metod. Dále jsou na MU prováděny analýzy pomocí ICP-MS k přesnému stanovení míry rekuperace fosforu.

Bioelektrochemický systém umožňuje dosažení potřebného zvýšení pH bez přidávání externích chemických zásad, čímž zvyšuje efektivitu využití zdrojů a celkovou udržitelnost procesu.

Počáteční experimenty byly prováděny se syntetickým loužicím roztokem obsahujícím ionty potřebné pro tvorbu struvitu. Molární poměry fosforu, hořčíku a amonného dusíku byly systematicky měněny za účelem optimalizace rekuperace fosforu. Zároveň byly testovány různé typy membrán pro posouzení jejich vlivu na výkonnost systému.

Při použití syntetického loužicího roztoku bylo již dosaženo účinnosti rekuperace fosforu přesahující 90 %. Předběžné analýzy XRD potvrzují tvorbu struvitu spolu s dalšími fosfátovými fázemi.

V další fázi studie budou v bioelektrochemickém systému použity reálné loužicí roztoky získané extrakcí fosforu pomocí biogenní kyseliny sírové, aby byl posouzen výkon procesu za realističtějších podmínek.

Položení základů: Datové požadavky pro posuzování životního cyklu a nákladů životního cyklu

Další aktivita projektu PHOS4PLANT si klade za cíl důsledně vyhodnotit environmentální výkonnost a ekonomickou životaschopnost inovativních technologií pro zpětné získávání fosforu. Co je posuzování životního cyklu (Life Cycle Assessment, LCA) – a proč je zde důležité? LCA je standardizovaná metoda (ISO 14044) pro kvantifikaci environmentálních dopadů produktu nebo procesu „od kolébky po hrob“ – od těžby surovin až po konečnou likvidaci. Namísto sledování jediného zdroje emisí či spotřeby energie poskytuje LCA komplexní obraz. Vedle environmentální analýzy zachycuje hodnocení nákladů životního cyklu (Life Cycle Costing, LCC) celkové ekonomické náklady v rámci stejného systémového vymezení.

Společně tyto nástroje umožňují projektu PHOS4PLANT odpovědět na klíčovou otázku: je nové fosforečné hnojivo na biologického původu skutečně lepší – z hlediska životního prostředí i ekonomiky – než konvenční alternativy? Porovnávají se tři procesní řetězce:

- V1 – Hnojivo PHOS4PLANT: spalování kalů z čistíren odpadních vod (rotační pec) → karbonatace → loužení na bio bázi (s konvenčním loužením jako referenčním bodem) → srážení
- V2 – Konvenční hnojivo z odpadů: spalování (fluidní lože) → chemické loužení (HCl nebo H₂SO₄) → srážení
- V3 – Fosilní hnojivo: konvenční výroba z primárních nerostných surovin

Tým vyvinul komplexní rámec pro sběr dat – soubor strukturovaných a uživatelsky přívětivých formulářů v Excelu spolu s doprovodným metodickým dokumentem – který umožňuje všem projektovým partnerům zaznamenávat materiálové a energetické toky jejich procesů v jednotném formátu kompatibilním s LCA. Formuláře zahrnují vstupy (zdroje energie, jako je elektřina, teplo, zemní plyn, a provozní materiály včetně činidel, jako jsou Na₂CO₃, CaO, HCl a H₂SO₄), přímé emise do ovzduší a vody (např. olovo, kadmium, arsen), výstupy ve formě hnojiv a související náklady na jednotku produkce.

Jak bude hodnocena environmentální výkonnost? Rámec pro výpočet LCA, který je již vyvíjen v předběžném tabulkovém modelu, je strukturován podle dobře zavedených kategorií dopadů z metodiky CML. Dvě nejvýznamnější z nich jsou změna klimatu (vyjádřená v kg CO₂ ekvivalentu, zachycující příspěvky skleníkových plynů) a acidifikační potenciál (kg SO₂ ekvivalentu, relevantní pro kroky kyselého loužení, které jsou pro projekt PHOS4PLANT klíčové). Mezi další kategorie patří eutrofizace, toxicita pro člověka a kumulativní energetická náročnost. Doplňkově k environmentálním ukazatelům jsou paralelně sledovány výrobní náklady pro každou procesní skupinu – zahrnující energii, provozní materiály, úpravu emisí a kredit za produkci hnojiv – což umožňuje přímé porovnání nákladů mezi jednotlivými variantami. V dalších krocích bude sběr dat probíhat souběžně s pokračující optimalizací procesů v laboratoři a bude sloužit jako vstup pro kompletní analýzu LCA a LCC plánovanou na 3. rok projektu.

Aktivity zaměřené na šíření výsledků

Rebeka Frühholz (K1-MET) a Jiří Kučera (Masarykova univerzita) představí svůj nejnovější výzkum na Mezinárodním sympoziu o biohydrometalurgii v Orléans (28.–30. září 2026), významné mezinárodní konferenci v oblasti biohydrometalurgie. Rebeka se zaměří na optimalizaci bakteriální oxidace síry, procesu, který v konečném důsledku vede k produkci kyseliny sírové, zatímco Jiří představí nedávné poznatky o roli nové rhodanézy v transportu síry během tohoto procesu.

Vysoké učení technické v Brně (VUT) uspořádalo diseminační akci ve formě workshopu s názvem „Phosphorus and Beyond: Circular Approaches in Waste Management“. Akce proběhla prezenčně na Fakultě strojního inženýrství dne 26. listopadu 2025. Zvolen byl hybridní formát, aby byla umožněna širší účast. Diseminační aktivity byly dále podpořeny spuštěním specializované projektové webové stránky na webu Ústavu procesního inženýrství. Dosud zde byly publikovány tři newslettery a další aktuality, které poskytují komplexní informace o projektu. Hlavní myšlenky projektu byly rovněž propagovány prostřednictvím článku v českém odborném časopise Technický týdeník. Článek s názvem „From Waste to Resource: Phosphorus from Sewage Sludge as a Path to a Circular Economy“ vyšel v čísle 03/2026 dne 10. března 2026.

Současně VUT ve spolupráci s projektovými partnery zahájilo práci na rukopisu určeném k odeslání do impaktovaného časopisu. Pracovní název „A Pilot-Scale Preparation of Pre-Treated Sewage Sludge Ash for Phosphorus Reclamation“ odráží jeho zaměření na tepelné zpracování kalového popela, včetně hodnocení mobility těžkých kovů a měření emisí.

BOKU University se zúčastnila workshopu pro stakeholdery organizovaného VUT. Projekt byl rovněž dvakrát prezentován na univerzitní úrovni studentům a dalším zájemcům. V dubnu tohoto roku organizuje BOKU University workshop zaměřený na diskusi projektových aktivit se stakeholdery. Projekt bude také představen na veřejné akci Long Night of Research, která je největší popularizační akcí vědy v Rakousku.

Zapojení partnerů



Společnost K1-MET má odborné zkušenosti s vývojem a optimalizací procesů pro zpracování zbytkových a recyklačních materiálů s cílem získávat cenné suroviny a uzavírat materiálové cykly. Úkolem K1-MET v projektu je proto získávání fosforu z popela čistírenských kalů prostřednictvím nepřímého bioloužení nebo loužení kyselinami a následná výroba rostlinného hnojiva bohatého na fosfáty. Tento proces je zároveň spojen s odstraňováním nečistot, například kovů, z popela čistírenských kalů. K1-MET je hlavním řešitelem (vedoucím partnerem) tohoto projektu.



Masarykova univerzita (MU) je druhou největší univerzitou v České republice. Na projektu se podílí Ústav biochemie, Ústav chemie a Ústav geologických věd. MU tým má mnohaleté zkušenosti v oblastech acidofilních mikroorganismů, molekulárních mechanismů interakcí mezi rostlinami a mikroorganismy, strukturně-funkční analýzy mikrobiálních společenstev, minerální analýzy a analýzy stopových prvků.



Do projektu je zapojen také tým z Ústavu procesního inženýrství Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (VUT), konkrétně z oddělení termických procesů a čištění plynů. Tento tým má rozsáhlé zkušenosti v oblasti termických procesů a čištění emisí. V rámci projektu je zodpovědný za produkci popela z čistírenského kalu. Ústav disponuje bubnovou sušárnou a rotační pecí, které jsou nezbytné pro experimenty v poloprodučním měřítku. Kromě toho má k dispozici analytickou infrastrukturu pro měření vlastností paliv a odpadů a pro analýzu emisí spalin.



Institut pro nakládání s odpady a cirkularitu (ABFK-BOKU) se zaměřuje na bezpečné odstraňování a recyklaci odpadů s cílem snižovat jejich množství a šetřit primární zdroje v primární výrobě. Jeho úkoly v projektu zahrnují předúpravu vysoce alkalických popelů, které brání biologickému loužení tohoto materiálu, bioloužení popela z čistírenských kalů a identifikaci acidofilních bakterií z čistírenského kalu. Kromě toho bude celý proces vyhodnocen pomocí posouzení životního cyklu (LCA).



Spolufinancováno
Evropskou unií



PHOS4PLANT



EVROPSKÁ UNIE

Projekt PHOS4PLANT (ATCZ00043) je spolufinancován z Evropského fondu pro regionální rozvoj v rámci programu Interreg Rakousko – Česko 2021 – 2027.

Odpovědnost za obsah: Nadine Kleinbruckner (K1-MET), Peter Beigl (ABFK-BOKU)