

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

Jak lze fosfor obsažený v čistírenských
kalech využít k lepšímu uzavření koloběhu
fosforu.



Motivace

Fosfor je pro zemědělskou produkci nezbytným hnojivem, avšak jeho zásoby jsou omezené, regionálně soustředěné a těží se za nepříznivých podmínek. Vzhledem ke svému významu a vysoké závislosti na dovozu je od roku 2014 na seznamu kritických surovin EU. Přibližně 90 % fosforu obsaženého v odpadních vodách se zachycuje v čistírenských kalech – 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 1

Úprava popela: aditivace a spalovací zkoušky

Vše, co v projektu PHOS4PLANT následuje, závisí na materiálu vytvořeném v Pracovním balíčku 1: popelu z čistírenských kalů, ze kterého lze uvolnit fosfor a jehož obsah těžkých kovů neohroží konečné hnojivo. Tento materiál utvářejí dvě aktivity — laboratorní optimalizace aditivace a poloprovozní spalování na VUT (Aktivita 1.2) a karbonatace výsledného popela na Univerzitě BOKU (Aktivita 1.3).

Program laboratorních aktivit VUT je postaven na metodice plánování experimentů (DOE), která umožňuje posoudit vliv několika procesních parametrů – typu aditiva, dávkování, teploty spalování a zvolené doby zdržení – současně, nikoli postupně jeden po druhém. Zkoušky byly dosud prováděny především na vzorku CZ6, reprezentativním českém kalu vybraném v rámci dřívější screeningové kampaně.

Dosavadní výsledky již změnily volbu aditiv. Aditiva na bázi síranů, která se v úvodním screeningu jevila jako slibná, se v praxi ukázala jako nevhodná: jejich použití je doprovázeno výrazným nárůstem emisí SO_2 , jejichž řešení je v průmyslovém měřítku obtížné a nákladné. Pozornost se proto přesunula k jiným typům aditiv, která slibují příznivější vliv na těkání těžkých kovů při současném zadržení fosforu v popelu. Vzniklé série popelů jsou analyzovány (ICP a XRD) ve spolupráci s Masarykovou univerzitou (MU). Souběžně byly na VUT a MU podrobně charakterizovány také rakouské kaly.

Úprava popela: karbonatace pro snížení spotřeby kyseliny

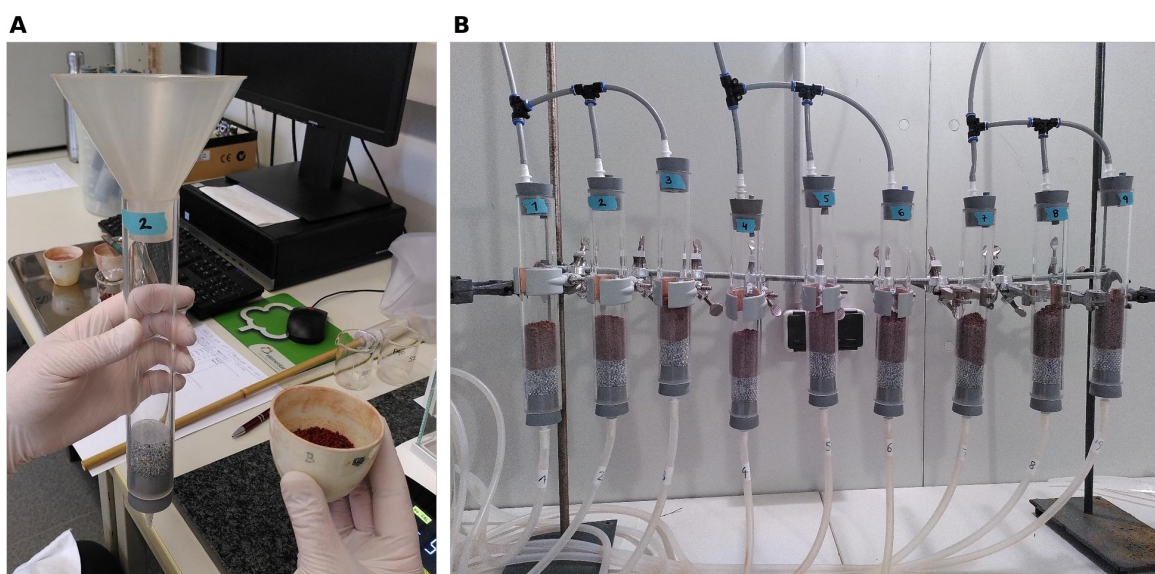
Biologické loužení bakterií *Acidithiobacillus thiooxidans* probíhá nejlépe ve výrazně kyselém prostředí při pH přibližně 2,0 až 3,5. Popel z čistírenských kalů je naopak často alkalický a jeho převedení do pracovního rozsahu spotřebovává kyselinu, kterou je třeba vyrobit či koupit. Aktivita 1.3 zkoumá, zda část této práce může předem odvést úprava pomocí oxidu uhličitého. Univerzita BOKU vystavila dva popely z prvního pilotního spalování na VUT – bez aditiv a aditivovaný – působení čistého CO_2 nebo okolnímu vzduchu po dobu 48 hodin v průtočných kolonách při poměrech kapaliny k pevné fázi mezi 0,0 a 0,8, pro každou podmínku trojmo.

Nejhmotatelnější výsledek těchto zkoušek se týká spotřeby kyseliny u neaditivovaného popela. Titrace 0,5 M kyselinou sírovou ukázala, že neupravený materiál vyžadoval celkem $3,58 \pm 0,32$ ml k dosažení pH 3,5, zatímco tentýž popel po karbonataci pouze $2,77 \pm 0,31$ ml – tedy přibližně o pětinu méně kyseliny během kritické rané fázi loužení, kdy rychlý pokles pH udržuje acidofilní kulturu produktivní. Následné přidávání kyseliny však přivedlo karbonatovaný i nekarbonatovaný popel na prakticky stejný konečný bod pH $1,85 \pm 0,11$, což naznačuje, že přínos karbonatace je omezen na začátek procesu loužení.

Množství skutečně vzniklého uhličitanu bylo naproti tomu skromné. Celkový uhlík v upravených popelech zůstal mezi 0,1 a 0,3 % sušiny, tedy na mezi detekce analyzátoru, bez zřejmého trendu napříč testovanými poměry kapaliny a pevné látky a bez měřitelné výhody čistého CO_2 oproti okolnímu vzduchu. Pravděpodobné vysvětlení spočívá v samotném popelu: při kontaktu s deionizovanou vodou reagoval neaditivovaný popel z rotační pece neočekávaně mírně kyselé až neutrálně (pH 5,9 až 6,3), na rozdíl od výrazně alkalických popelů uváděných u spalování ve fluidním loži. Popel, který je již blízko neutrálnímu stavu, jednoduše poskytuje menší prostor pro karbonataci.

Aditivovaný popel se choval odlišně, a to v neočekávaném směru. Jeho pH vodného roztoku bylo výrazně zásaditější (8,3), což pravděpodobně souvisí s přidavkem síranu hořečnatého. Karbonatace snížila toto pH o 1,8 až 2,1 jednotky, avšak materiál při titraci tak silně pufroval, že pH 3,5 nebylo možné dosáhnout vůbec, a to ani po přidání 9,99 ml 0,5 M kyseliny sírové. U tohoto popela tedy aditivace spíše zvýšila než snížila spotřebu kyseliny – tento poznatek je užitečné znát dříve, než by se projevil v pilotním měřítku.

Na základě těchto dat byly parametry karbonatace stanoveny na 20 °C, 100 % CO_2 , doba úpravy 48 hodin a počáteční poměr kapaliny a pevné látky 0,3, přičemž popel upravený za těchto podmínek se nyní připravuje pro projektového partnera K1-MET. Pro zajištění jednotné přípravy vzorků a sestavení kolon mezi jednotlivými běhy byl sepsán standardní operační postup a bylo dokončeno shrnutí získaných karbonatačních dat pro jednotlivé popele.



Obrázek 1: Karbonatační zkoušky na Univerzitě BOKU s popelem z čistírenských kalů vyrobeným na VUT. A) Plnění připravené kolony zvlhčeným popelem; B) Uspořádání průtočných karbonatačních zkoušek s devíti propojenými kolonami obsahujícími popely z pilotního spalování na VUT.

Výhled do budoucna: Směrem k druhé pilotní kampani

Pracovní balíček 1 se nyní posouvá od charakterizace k druhému, lépe podloženému průchodu řetězcem přípravy popela. Současné i nadcházející měsíce budou věnovány čtyřem liniím práce:

- Výběr rakouského kalu jako vstupní suroviny – analýzy na VUT a MU jsou dokončeny a celkově nejprůmyslnější složení pro PB 1 nabízí rakouský kal AT9.
- Aditiva odpadního původu – kandidátské materiály z odpadních toků, mezi nimiž jsou vaječné skořápky, solanky a roztoky solí (hlinitý kal) a PVC, jsou získávány, charakterizovány a laboratorně testovány (VUT + MU) jako náhrada komerčních čistých činidel, v souladu s principy cirkulární ekonomiky, na nichž je projekt postaven.
- Druhá pilotní kampaň – vybrané aditivace budou aplikovány na kal rakouského původu v rámci druhého pilotního sušení a spalování, čímž vznikne nová šarže popela.
- Další kolo karbonatace – zkoušky s aditivovaným i neaditivovaným popelem prokázaly pouze omezenou karbonataci a snížení pH a na rozdíl od typicky alkalického popela ze spalování ve fluidním loži reagoval neaditivovaný popel ve vodě mírně kysele až neutrálně. Další pilotní zkoušky s jinými druhy popela z čistírenských kalů by mohly poskytnout vhodné vzorky; pokud by se u nich podařilo dosáhnout vyšší počáteční hodnoty pH, bylo by možné u nich rovněž vyhodnotit potenciální vliv karbonizace na následné vyluhování a výrobu hnojiv.

V souhrnu poskytují tyto dvě představené činnosti aktuální obraz o počáteční fázi projektu: laboratorní práce má za cíl identifikovat aditiva, která má smysl použít v dalším pilotním testu, zatímco zkoušky karbonatace slouží ke kvantifikaci potenciálu pro snížení spotřeby látek snižujících pH.

Diseminační aktivity

V rámci diseminačních aktivit Masarykovy univerzity byla na 26. mezinárodním biohydrometalurgickém symposiu (IBS 2026), které se konalo 28.–30. září 2026 ve francouzském Orléans, prezentována studie o transportu síry v modelové acidofilní bakterii oxidující síru. Rozšířený abstrakt byl publikován ve sborníku konference. Projekt PHOS4PLANT byl rovněž představen během Noci vědců 25. září 2026 v Univerzitním kampusu v Brně. Středoškolská studentka Michaela Dvořáková se navíc ve svém výzkumném projektu PHOSMAG zabývala biogenním kompozitem schwertmannit–magnetit pro získávání fosforu. Její práce postoupila do krajského kola Středoškolské odborné činnosti (SOČ) 2026, čímž přispěla k šíření výzkumu souvisejícího s projektem mezi mladými vědeckými pracovníky.

Vysoké učení technické v Brně (VUT) se zúčastnilo 2. projektového workshopu, který pořádala Univerzita BOKU ve Vídni 22. dubna 2026, a to s prezentací „Motivation of phosphorus reclamation from the sewage sludge“, kterou přednesl Vladimír Brummer. Manuskript připravený VUT společně s projektovými partnery pod názvem „A Pilot-Scale Preparation of Pre-Treated Sewage Sludge Ash for Phosphorus Reclamation“ je průběžně vylepšován a blíží se jeho odevzdání. Bernadette Goma rovněž prezentovala příspěvek „Thermochemical removal of heavy metals from sewage sludge“ na 13. mezinárodní konferenci o energii, udržitelnosti a klimatické krizi, která se konala v řeckém Rethymnu ve dnech 24.–28. srpna 2026. VUT v současné době také pořádá Mezinárodní týdny inženýrských projektů – podzim 2026 na Ústavu procesního inženýrství, které se konají od 31. srpna do 25. září 2026 na téma „Integrated Waste Management and Treatment Processes“ (Integrované procesy nakládání s odpady a jejich zpracování). Program přivedl do Brna skupinu výměnných studentů z Německa (Augsburg), kteří se prostřednictvím projektové práce pod odborným vedením seznámili s celou řadou témat, včetně zpracování odpadu a zpětného získávání fosforu – což je hlavní předmět projektu PHOS4PLANT.

Univerzita BOKU představila výsledky karbonatace popelů z čistírenských kalů na 13. mezinárodní konferenci Sustainable Solid Waste Management, která se konala 24.–27. června 2026 na řeckém ostrově Kós.

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 podílejí 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 poloprovozním 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: Vladimír Brummer (VUT), Hannes Konegger (ABF-BOKU), Christian Zafiu (ABF-BOKU)

Strana 6