



## Stav a možnosti využívania digestátu z bioplynových staníc

*Miroslava ŠVECOVÁ<sup>1</sup>, Miloš MATÚŠ<sup>\* 1</sup>*

<sup>1</sup> Slovenská technická univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta, Námestie slobody 17, 81231 Bratislava, Slovenská republika

\* **Email:** milos.matus@stuba.sk

*Súčasný trend výrazného nárastu počtu bioplynových staníc prináša so sebou aj značný nárast vedľajšieho odpadného produktu – digestátu. Ten sa vo väčšine prípadov využíva iba ako hnojivo, čo však prináša aj nepriaznivý dopad so zvyšujúcim sa dusíkom v pôde. Príspevok je zameraný na rozsiahlu analýzu možností využívania digestátu z bioplynových staníc s ťažiskom na jeho energetické zhodnotenie. Cieľom príspevku je poukázať na vysoký energetický potenciál digestátu a možnosti jeho ekonomicky efektívneho spracovania do formy tuhého biopaliva. Príspevok prináša zhrnutie výskumu v oblasti zhodnocovania digestátu z bioplynových staníc, vrátane jeho energetických vlastností ako paliva, a posúdenia spracovania digestátu z pohľadu zdravia.*

**Kľúčové slová:** digestát, fermentácia, biopalivo, pelety

### 1 Úvod

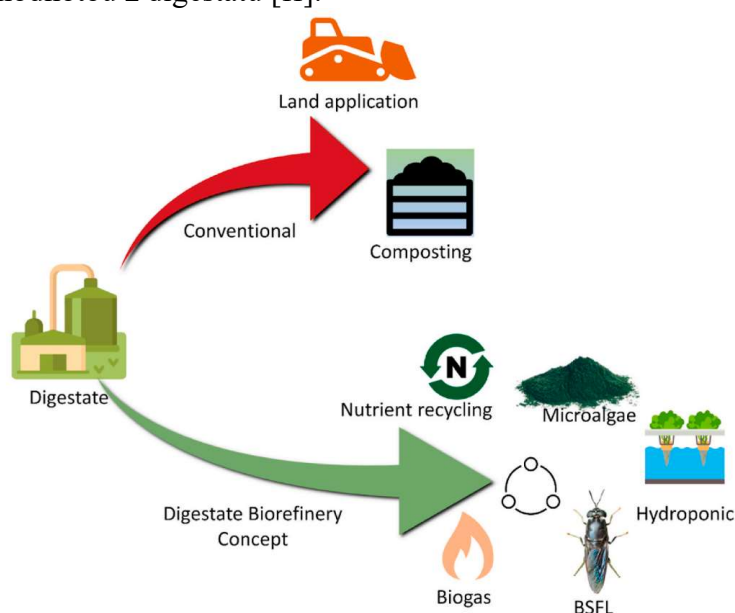
Procesom anaeróbnej digestácie organického odpadu vzniká zmes plynov tzv. „bioplyn“, ktorý tvorí približne 50 % metánu (CH<sub>4</sub>) a 50 % oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>). Pri tomto procese vzniká aj odpad vo forme digestátu [1,2]. Vzniknutý bioplyn sa po čistení najčastejšie využíva v mieste svojej výroby na výrobu elektriny s použitím spaľovacích motorov [3]. Priemerná bioplynová stanica s inštalovanou kapacitou 500 kW vyprodukuje ročne okolo 1000 ton sušiny digestátu [4]. Digestát pozostáva z kvapalnej a pevnej frakcie. Kvapalná frakcia obsahuje vysoký podiel živín, pričom pevná frakcia má vlastnosti, ktoré priaznivo ovplyvňujú tvorbu humusu. Vzhľadom na vlastnosti digestátu sa doteraz používal hlavne na hnojenie. [5,6]. Vzhľadom na výstavbu mnohých bioplynových staniciach v Poľsku v posledných rokoch – z 8 v roku 2008 na 93 v roku 2016 (Energetický regulačný úrad), došlo aj k výraznému zvýšeniu množstva digestátu, ktorý sa má byť spravovaný. V súčasnosti sa sušina vyprodukovaného digestátu odhaduje na 172 000 ton za rok. Toto množstvo digestátu nie je možné spravovať lokálne. Z doterajšieho výskumu [7] vyplýva, že je ekonomicky nerentabilné prepravovať digestát na vzdialenosť viac ako 10 km od miesta jeho vzniku, ak sa má použiť na hnojenie. Naopak, tekuté a pevné frakcie digestátu obsahujú vysoký obsah dusíka, v organickej aj anorganickej forme [8]. To obmedzuje možnosť dávkovania digestátu do pôdy v súlade s Európskou smernicou o dusičnanoch (1991) [9], ktorá stanovuje ročný limit dávky dusíka na úrovni 170 kg na hektár plantáže. Toto obmedzuje zisky poľnohospodárskych bioplynových staníc využívajúcich močovku (hlavný zdroj dusíka v postfermentácii) ako inhibítor procesu fermentácie metánu. Sú nútení zaplatiť príjemcovi za likvidáciu vzniknutej postfermentačnej hmoty alebo prenajať dostatočne veľké plochy, aby sa digestát rozložil pri zachovaní limitu dávky hnojív. Zaujímavou alternatívou sa preto javí možnosť využitia digestátu ako pevného



biopaliva, napr. vo forme peliet alebo brikiety. S cieľom znížiť náklady na dopravu by sa digestát mohol sušiť priamo na mieste. Odpadové teplo vznikajúce v bioplynovej stanici možno použiť na sušenie digestátu tak, aby obsah sušiny v hotovom výrobku bol 80-90%. Materiál by sa po aglomerácii na pelety alebo briкеты ľahšie skladoval a prepravoval. Popol vznikajúci v procese spaľovania (po očistení od ťažkých kovov) možno použiť na hnojenie [10].

## 2 Možnosti využitia digestátu z bioplynových staníc

Obrázok 1 ukazuje konvenčné využitie digestátu a zároveň objasňuje širší koncept biorafinérie obehového hospodárstva založeného na digestáte. Predtým bolo použitie digestátu obmedzené na aplikáciu na pôdu na obohatenie obsahu živín v pôde a ako suroviny na kompostovanie. V poslednom desaťročí boli skúmané rôzne spôsoby, ako získať energiu a produkty s pridanou hodnotou z digestátu [11].



Obr. 1 Koncept biorafinérie anaeróbného digestátu [11]

### 2.1 Zdroj mikrorias

Mikroriasy sú vodné eukaryotické fotosyntetické mikroorganizmy, ktoré na svoj rast využívajú živiny a CO<sub>2</sub>. Kultivácia mikrorias má rôzne výhody, napríklad ide o uhlíkovú negatívny proces (absorpcia CO<sub>2</sub>), biomasu možno premeniť na vysokokvalitné palivo (lipidy v biomase) [12,13]. Štúdie ukázali, že anaeróbný digestát možno efektívne použiť na pestovanie kmeňov rias vo vsádzkových alebo kontinuálnych reaktoroch [14,15,16,17,18]. Kultivované riasy možno ďalej použiť na výrobu bioetanolu.

### 2.2 Obnova živín

Výroba hnojív sa vo veľkej miere spolieha na neobnoviteľnú energiu a neudržateľné zdroje. Očakáva sa, že globálny dopyt po hnojivách porastie tak, aby zodpovedal požiadavkám na potraviny [19]. Preto sa skúmali alternatívne zdroje živín, ako sú prúdy odpadových vôd, moč, splaškové kaly a digestát na obnovu a recykláciu zdrojov. Spomedzi rôznych živín



prítomných v odpadovej biomase si veľkú pozornosť získalo znovuzískavanie fosforu. Fosfor je neobnoviteľný zdroj, ktorý je jedným z kľúčových prvkov používaných v hnojivách a rozhodujúci pre rast rastlín [20]. Okrem toho je zdroj fosforu obmedzený a pri súčasnej rýchlosti ťažby sa očakáva vyčerpanie ložísk v nasledujúcich 50 – 300 rokoch [21-23]. Na prekonanie problémov spojených s nedostatkom fosforu je potrebná zvýšená poľnohospodárska účinnosť a obnova/opätovné využitie fosforu [24]. Spôsobmi a účinnými technológiami sa zaoberajú práce [25,26,27,28]. Živiny získané z digestátu by mohli byť udržateľnou alternatívou k hnojivám. Na implementáciu v plnom rozsahu je však potrebné realizovať technicko-ekonomickú a environmentálnu realizovateľnosť [11].

### **2.3 Rekuperácia obnoviteľných palív**

Počas anaeróbnej digestácie komplexnej zmesi biomasy sa najskôr spotrebuje ľahko rozložiteľný substrát, čo vedie k akumulácii komplexného a nepoddajného substrátu, t.j. lignocelulózovej frakcie. Väčšina tohto čiastočne degradovaného komplexného substrátu skončila v digestáte [29]. Aj po anaeróbnej digestácii je teda možné získať značné množstvo energie z digestátu [30]. Na ďalšie získavanie energie z digestátu boli použité rôzne fyzikálno-chemické metódy dodatočnej úpravy. Tepelná premena digestátu na energiu a ďalšie získavanie produktov s pridanou hodnotou si v posledných desaťročiach získala veľkú pozornosť [31,32,33]. Rôzne tepelné procesy používané na spracovanie digestátu zahŕňajú hydrotermálnu karbonizáciu, pyrolýzu, splyňovanie a spaľovanie [34,35].

### **2.4 Recirkulácia digestátu pre zvýšený výťažok metánu**

Recirkulácia digestátu z mezofilnej do termofilnej fázy zlepšuje účinnosť acetogenézy a metanogenézy v termofilnej fáze. Tým sa tiež zvyšuje produkcia metánu a odstraňovanie organických látok [36]. Spôsobmi a účinnými technológiami sa zaoberajú práce [37-41].

### **2.5 Kultivácia lariev muchy čierneho vojaka**

Pestovanie lariev mušky čierneho vojaka (BSFL) nadobudlo význam pre svoje potenciálne využitie ako udržateľné krmivo pre zvieratá. Navyše v porovnaní s konvenčnými zložkami krmiva pre zvieratá, ako je sója, má produkcia BFSL nižšie emisie skleníkových plynov (GHG), nižšiu spotrebu vody, nižšie emisie amoniaku a menšiu ekologickú stopu. Preto môžu byť udržateľným zdrojom krmiva pre ryby a hydinu [42, 43]. Týmto spôsobom využitia digestátu sa venujú práce [44,45].

### **2.6 Pestovanie húb**

V priebehu rokov sa na kultiváciu húb úspešne aplikoval digestát z biorafinérskych zariadení, ako sú kukuričné etanolové výpalky, etanolová vináza na báze cukru, bionafta a surový glycerol [46,47]. Na pestovanie húb sa používajú rôzne substráty, ako sú piliny, kukuričné klasy a bagasa z cukrovej trstiny [48]. Pestovanie húb pomocou anaeróbneho digestátu si však získalo popularitu, pretože zlepšuje výnos húb a kvalitu produktu [49,50].



## 2.7 Hydroponické pestovanie

V priebehu rokov si získalo pozornosť využívanie bezpôdnej produkcie jedlých plodín (zeleniny) s použitím digestátu ako potenciálneho hnojiva, pretože by to mohla byť sľubná alternatíva pre nakladanie s organickým odpadom [51,52].

## 2.8 Výroba polyhydroxyalkanoátov (prekursorov bioplastov)

Polyhydroxyalkanoáty (PHA) sú skupinou biodegradovateľných polyesterov akumulovaných špecifickými baktériami za podmienok s vyšším obsahom uhlíka a nízkych živín [53]. Aby bola výroba PHA cenovo konkurencieschopnejšia, výskumníci vyhodnotili potenciálne využitie lacno dostupného uhlíka (prchavé masné kyseliny z odpadových vôd) a zdrojov živín [54,55]. Digestát je bohatým zdrojom rôznych živín a stopových prvkov potrebných pre optimálnu akumuláciu PHA.

## 2.9 Účinky digestátu na pôdnu mikrobiálnu početnosť a diverzitu

Aplikácia tekutého digestátu ako biohnojiva si získala obľubu, pretože obsahuje primerané množstvo živín potrebných pre rast rastlín [56]. Niektoré z hlavných obáv týkajúcich sa aplikácie digestátu sú pochopenie kľúčových mikrobov prítomných v digestáte, ich potenciálne agronomické využitie a ich schopnosť ovplyvňovať zloženie pôdy a následný rast rastlín [57,58].

## 2.10 Bežné postupy hospodárenia s digestátom

Digestát pozostáva zo zvyškovej suroviny bohatej na mikro a makroživiny, vďaka čomu je hodnotným hnojivom. Recyklácia digestátu ako hnojiva je najudržateľnejším a najefektívnejším spôsobom, ak spĺňa špecifikované kritériá. V závislosti od konečného použitia môže byť digestát použitý ako vyrobený alebo ďalej rafinovaný pomocou spracovateľského reťazca na oddelenie pevných a kvapalných frakcií. Digestát obsahuje základné živiny pre rastliny a obohacuje pôdne vlastnosti, ako je organická hmota, hydraulická vodivosť a objemová hmotnosť [60,61]. Digestát je bohatým zdrojom fosforu, dusíka a organických látok a bežne sa používa ako hnojivo [62,63]. Priama aplikácia digestátu na recykláciu živín je široko používaná, pretože je to jedna z nákladovo efektívnych a rýchlych metód v porovnaní s kompostovaním. Anaeróbny digestát má vyšší pomer amónneho dusíka: celkového dusíka, nižší organický uhlík, mierne zásadité pH, zníženú organickú hmotu a zníženú biochemickú spotrebu kyslíka (BSK) v porovnaní s nestráveným odpadom. Uvádza sa, že digestát obsahuje rôzne bioaktívne zlúčeniny, ako sú voľné aminokyseliny, vitamíny, humínová kyselina a kyselina fulvová, ktoré môžu podporovať rast rastlín [64].

Kompostovanie je jednou z najpoužívanejších techník na nakladanie a stabilizáciu rôznych organických odpadov. Kompostovanie organických látok tiež vedie k prevencii emisií skleníkových plynov (GHG), zabraňuje eutrofizácii vodných útvarov a kompost môže zlepšiť kvalitu pôdy [65]. Pri kompostovaní dochádza k čiastočnej mineralizácii a zvlhčovaniu biomasy, čo zvyšuje celkovú kvalitu kompostu. Rôzne charakteristiky surovín, ako je pomer uhlíka k dusíku (C/N), obsah vlhkosti, pH a frakcia lignocelulózy ovplyvňujú celkovú kvalitu kompostu a čas potrebný na kompostovanie. Digestát je bohatým zdrojom dusíka a fosforu,



životne dôležitého pre rast rastlín; takto získaný kompost môže nahradiť alebo znížiť potrebu hnojiva. Avšak vysoký obsah vlhkosti a nízky pomer C/N digestátu bránia efektívnemu kompostovaniu digestátu [66]. Na úpravu zloženia rozkladu pred kompostovaním je teda potrebné zmiešanie s rôznymi objemovými činidlami a odpadom. Song a spol. [67] študovali spoločné kompostovanie digestátu potravinového odpadu so zrelým kompostom a pilinami. Počas fázy kompostovania pridávanie zrelého kompostu a pilín na strávenie zvyšuje rýchlosť rozkladu. Navyše, oveľa vyšší index klíčivosti semien sa dosiahol s kompostom získaným zo spoločného kompostovania ako s kompostovaním s digestátom. V nedávnej minulosti rôzni výskumníci použili biouhlie, materiál bohatý na uhlík, ktorý sa zvyčajne pripravuje z odpadovej biomasy, na zlepšenie procesu kompostovania rôznych surovín [68]. Pridávanie biouhlia počas kompostovania má viacero výhod: zlepšenú cirkuláciu vzduchu, zvýšený proces zvlhčovania, zadržiavanie dusíka v komposte, zníženú toxicitu a zvýšenú mikrobiálnu aktivitu [69,70]. Manu a kol. [71] použili rôzne dávky (10–40 % hmotn. základu) biouhlia bacco na kompostovanie digestátu z potravinového odpadu bohatého na amónne látky. Bolo pozorované, že počas mezofilnej fázy kompostovania dosiahol digestát potravinového odpadu + biouhlie o 15 °C vyššiu teplotu (65 °C) nadkontrolu (50 °C). Okrem toho sa strata NH<sub>3</sub> a N znížila o 58 % a 5 % s pridaním 10 % biouhlia počas procesu kompostovania.

## 2.11 Vlastnosti digestátu ako paliva

Z hľadiska využitia digestátu ako paliva je jeho základnou vlastnosťou výhrevnosť. Tá je závislá predovšetkým od obsahu sušiny a horľavých látok. Všeobecne má zvyšok po suchej fermentácii väčší obsah sušiny a k ďalšiemu tepelnému spracovaniu je teda vhodnejší ako zvyšok po mokrej fermentácii. Zásady pre ďalšie spracovanie, ak nedosahuje potrebný obsah sušiny, platia rovnaké ako pri mokrej fermentácii. V nasledujúcej časti je v tabuľkách (tab. 1-4) uvedený detailný rozbor paliva (prvková analýza) vzniknutého po anaeróbnej suchej fermentácii. Rozbor bol vykonaný u pôvodnej vzorky a odvodnenej vzorky. [72]

Tab. 1 Palivové vlastnosti – pôvodná vzorka [72]

	Voda	Popol	Horľavina	Prchavá horľavina	Spalné teplo	Výhrevnosť
	W <sup>r</sup> <sub>t</sub> [%]	A <sup>r</sup> [%]	h <sup>r</sup> [%]	V <sup>r</sup> [%]	Q <sub>s</sub> <sup>r</sup> [MJ/kg]	Q <sub>s</sub> <sup>r</sup> [MJ/kg]
<b>Zbytok po fermentácii</b>	70,46	13,41	16,13	12,39	3,37	1,42

Tab. 2 Prvkový rozbor – pôvodná vzorka [72]

H <sup>r</sup> [%]	C <sup>r</sup> [%]	S <sup>r</sup> [%]	N <sup>r</sup> [%]	O <sup>r</sup> [%]
8,99	1,02	0,69	5,32	0,10

Tab. 3 Palivové vlastnosti – odvodnená vzorka [72]

	Popol	Horľavina	Prchavá horľavina	Spalné teplo	Výhrevnosť
	A <sup>r</sup> [%]	h <sup>r</sup> [%]	V <sup>r</sup> [%]	Q <sub>s</sub> <sup>r</sup> [MJ/kg]	Q <sub>s</sub> <sup>r</sup> [MJ/kg]
<b>Zbytok po fermentácii</b>	45,39	54,61	41,95	11,39	10,64



Tab. 4 Prvkový rozbor – odvodnená vzorka [72]

H <sup>d</sup> [%]	C <sup>d</sup> [%]	S <sup>d</sup> [%]	N <sup>d</sup> [%]	O <sup>d</sup> [%]
3,45	30,44	0,35	2,35	18,02

Autori vo vedeckej štúdií [75] použili ako skúšobné palivo dva rozdielne digestáty na báze rôznych surovín. Zloženie suroviny je uvedené v tabuľke 5. Pôvodom oboch digestátov boli bioplynové stanice s technológiou mokrej fermentácie. Digestáty boli najprv odvodnené a potom vysušené bubnovou sušiarňou na obsah vlhkosti 15–20 % vlhkého základu. Pre spaľovanie bol takto vysušený digestát peletovaný bez ďalších aditív.

Tab. 5 Zloženie vstupnej suroviny digestátov používaných ako testované palivo (hmotnostný podiel čerstvej hmoty v %) [75]

Vzorka	Zloženie	%
Digestát 1	kukuričná siláž	50
	tráva a trávna siláž	40
	zemiaky	10
Digestát 2	kukuričná siláž	81
	siláž z cukrovej	9
	cirokovej/sudánskej trávy	
	hydínový trus	7
	zmes kukuričných klasov	3

Tab. 6 Spalné teplo a výhrevnosť peliet z digestátu 1 a 2. [75]

	Obsah vody %	Spalné teplo MJ.kg <sup>-1</sup>	Výhrevnosť MJ.kg <sup>-1</sup>
Digestát 1	9,2	17,3	15,8
Digestát 2	9,9	16,4	15,0

Ako ukazuje tabuľka 6, výhrevnosť digestátu 1 bola 15,8 MJ.kg<sup>-1</sup> pri obsahu vody 9,2 %. Pelety digestátu 2 vykazovali nižšiu výhrevnosť 15,0 MJ.kg<sup>-1</sup> pri obsahu vody 9,9 %. Pelety vyrobené z borovicového dreva s obsahom vody 12,0 % vykazujú podobnú čistú výhrevnosť 16,3 MJ.kg<sup>-1</sup>.

### 3 Posúdenie spracovania digestátu z pohľadu zdravia

Výroba peliet z digestátu a následné využitie ako paliva bolo identifikované ako nádejný spôsob nie len na poskytovanie obnoviteľnej energie ale aj dodatočné príjmy pre farmy, pričom zároveň predstavuje potenciál na odklon surového digestátu z pôdy nasýtenej živinami a znížiť tak riziko pre kvalitu vody. Hoci predchádzajúci výskum skúmal uskutočniteľnosť výroby peliet, málo sa zameralo na aspekty biologickej bezpečnosti systému. V súčasnosti je málo známe o perzistencii baktérií prítomných v digestáte a možných dopadoch na ľudské zdravie pre tých, ktorí s týmto produktom manipulujú. Cieľom tohto výskumu bolo určiť vplyv, ktorý má každý krok v procese výroby peliet na množstvo baktérií: anaeróbna digestácia, mechanická separácia, sušenie pevných látok a peletizácia. Na kvantifikáciu baktérií bolo použité



stanovenie počtu Enterobacteriaceae metódou počtu kolónií a bola stanovená prítomnosť Salmonella v každom štádiu. Každý krok v procese výroby peliet digestátu zohráva úlohu pri znižovaní počtu Enterobacteriaceae. Konečný peletizačný krok znižuje počet Enterobacteriaceae pod detekovateľné úrovne a vyrobené pelety zodpovedajú špecifikácii PAS110 pre transport digestátu z fariem. Skladovanie peliet počas 33 dní v zimných a letných podmienkach nezaznamenalo žiadnu reaktiváciu počtu Enterobacteriaceae, čo naznačuje, že šírenie mikróbov je v konečnom produkte obmedzené a pelety nepredstavujú zvýšené riziko po skladovaní. Zistenia podporujú návrh, že pelety vyrobené z poľnohospodárskych anaeróbnych digestátov by mohli byť nádejným obnoviteľným palivom a zdôrazňujú potrebu ďalšieho výskumu ich spaľovacích vlastností. [73]

Produkcia bioplynu ako udržateľného zdroja energie sa zvyšuje, pričom digestát vzniká ako vedľajší produkt bioplynových staníc. V dôsledku toho vysoká koncentrácia Clostridium spp. v digestáte sa stala problémom v oblastiach chovu dojníc. Spory Clostridium môžu kontaminovať pôdu a plodiny, keď sa digestát používa ako hnojivo, čo spôsobuje rozpor v koexistencii medzi bioplynom a tradičnou výrobou syrov. Cieľom štúdie tohto problému bolo nájsť technické riešenie umožňujúce buď razantné zníženie alebo elimináciu obsahu Clostridium spp. v rámci digestátu. Výsledky ukázali úplnú elimináciu Clostridium spp. v peletovanom skladovanom tuhom digestáte; peletovanie navyše spôsobilo zníženie pH a podielu vody v čerstvej hmotnosti a koncentráciu minerálnych živín v porovnaní so skladovaným tuhým digestátom. Pelety môžu predstavovať možné udržateľné riešenie pri znižovaní potenciálnych rizík spojených s prítomnosťou Clostridium spp. v digestáte a pri zlepšení dopravy a distribúcie vysoko hodnotných hnojív. Peletovanie tuhého digestátu by teda mohlo predstavovať jednoduchú a účinnú metódu, ktorá umožní súdržnosť bioplynových staníc a mliečnych fariem. [74]

## 4 Záver

Príspevok je zameraný na rozsiahlu analýzu možností využívania digestátu z bioplynových staníc s ťažiskom na jeho energetické zhodnotenie. Cieľom príspevku je poukázať na vysoký energetický potenciál digestátu a možnosti jeho ekonomicky efektívneho spracovania do formy tuhého biopaliva. Príspevok prináša zhrnutie výskumu v oblasti zhodnocovania digestátu z bioplynových staníc, vrátane jeho energetických vlastností ako paliva, a posúdenia spracovania digestátu z pohľadu zdravia. Na výsledky publikovanej analýzy svetového výskumu je možné nadviazať pri ďalšom výskume zameranom na energetické využitie digestátu.

## PodĎakovanie

Tento príspevok vznikol za podpory projektu APVV-19-0607 “Optimalizované progresívne tvary a netradičné kompozitné suroviny ušľachtilých biopalív” financovaného Agentúrou pre vedu a výskum.

## Použitá literatúra

- [1] Bavutti, M.; Guidetti, L.; Allesina, G.; Libbra, A.; Muscio, A.; Pedrazzi, S. Thermal stabilization of digesters of biogas plants by means of optimization of the surface radiative properties of the gasometer domes. *Energy Procedia* 2014, 45, 1344–1353. [CrossRef]
- [2] Grinzi, G.; Guidetti, L.; Allesina, G.; Libbra, A.; Martini, P.; Muscio, A. Increase of net power generation of biogas plants by reduction of heat loss. In *Proceedings of the 20th*



- European Biomass Conference and Exhibition, Milano, Italy, 18–22 June 2012; ETA-Florence Renewable Energies: Munich, Germany, 2012.
- [3] Negri, M.; Bacenetti, J.; Brambilla, M.; Manfredini, A.; Cantore, A.; Bocchi, S. Biomethane production from different crop systems of cereals in Northern Italy. *Biomass Bioenergy* 2014, 63, 321–329. [CrossRef]
- [4] Lootsma, A.; Raussen, T. Aktuelle verfahren zur aufbereitung und verwertung von gärresten. *Witzenhausen-Institut GmbH (Hrsg.)* 2008, 20, 559–576.
- [5] Szufa, S.; Piersa, P.; Adrian, Ł.; Czerwińska, J.; Lewandowski, A.; Lewandowska, W.; Sielski, J.; Dzikuć, M.; Wróbel, M.; Jewiarz, M.; et al. Sustainable Drying and Torrefaction Processes of Miscanthus for Use as a Pelletized Solid Biofuel and Biocarbon-Carrier for Fertilizers. *Molecules* 2021, 26, 1014. [CrossRef]
- [6] Szufa, S.; Wielgosiński, G.; Piersa, P.; Czerwińska, J.; Dzikuć, M.; Adrian, Ł.; Lewandowska, W.; Marczak, M. Torrefaction of straw from oats and maize for use as a fuel and additive to organic fertilizers - TGA analysis, kinetics as products for agricultural purposes. *Energies* 2020, 13, 2064. [CrossRef]
- [8] Dohler, H.; Schliebner, P. Verfahren und Wirtschaftlichkeit der Garrestaufbereitung. *KTBL SCHRIFT* 2006, 444, 199. 8. Vismara, R.F.; Canziani, R.; Malpei, F.; Piccinini, S. *Biogas da Agrozootecnica e Agroindustria*; Dario Flaccovio: Milano, Italy, 2011.
- [9] European Commission. Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. *Off. J. Eur. Communities* 1991, 375, 1–8.
- [10] Härdtlein, M.; Eltrop, L.; Thrän, D. Voraussetzung zur Standardisierung Biogener Festbrennstoffe; Schriftenreihe “Nachwachsende Rohstoffe” der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Landwirtschaftsverlag GmbH: Münster, Germany, 2004; Volume 23.
- [11] Malhotra M., Aboudi K., Pisharody L., Singh A, J. Rajesh Banu, Shashi Kant Bhatia, Varjani S., Kumar S., Cristina González-Fernández, Kumar S., Singh S., Vinay Kumar Tyagi, Biorefinery of anaerobic digestate in a circular bioeconomy: Opportunities, challenges and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 166, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112642>.
- [12] Franchino M, Comino E, Bona F, Riggio VA. Growth of three microalgae strains and nutrient removal from an agro-zootechnical digestate. *Chemosphere* 2013; 92:738–44. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.04.023>.
- [13] Prandini JM, da Silva MLB, Mezzari MP, Pirolli M, Michelon W, Soares HM. Enhancement of nutrient removal from swine wastewater digestate coupled to biogas purification by microalgae *Scenedesmus* spp. *Bioresour Technol* 2016; 202: 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.082>.
- [14] Uggetti E, Sialve B, Latrille E, Steyer JP. Anaerobic digestate as substrate for microalgae culture: the role of ammonium concentration on the microalgae productivity. *Bioresour Technol* 2014; 152:437–43. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.036>.
- [15] Franchino M, Tigrini V, Varese GC, Mussat Sartor R, Bona F. Microalgae treatment removes nutrients and reduces ecotoxicity of diluted piggery digestate. *Sci Total Environ* 2016;569–570:40–5. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.100>.
- [16] Morales-Amaral M del M, Gomez-Serrano C, Acien FG, Fernández-Sevilla JM, Molina-Grima E. Production of microalgae using centrate from anaerobic digestion as the nutrient source. *Algal Res* 2015; 9:297–305. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.03.018>.





- [17] Wang Q, Hyman M, Higgins BT. Factors impacting the effectiveness of biological pretreatment for the alleviation of algal growth inhibition on anaerobic digestate. *Algal Res* 2021; 53:102129. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102129>.
- [18] Bchir FS, Gannoun H, Herry S El, Hamdi M. Optimization of *Spongiochloris* sp. biomass production in the abattoir digestate. *Bioresour Technol* 2011;102: 3869–76. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.036>.
- [19] Barzee TJ, Edalati A, El-Mashad H, Wang D, Scow K, Zhang R. Digestate biofertilizers support similar or higher tomato yields and quality than mineral fertilizer in a subsurface drip fertigation system. *Front Sustain Food Syst* 2019; 3:1–13. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00058>.
- [20] Alewell C, Ringeval B, Ballabio C, Robinson DA, Panagos P, Borrelli P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nat Commun* 2020;11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>.
- [21] Tyagi VK, Lo SL. Microwave irradiation: a sustainable way for sludge treatment and resource recovery. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 18:288–305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.032>.
- [22] Yan T, Ye Y, Ma H, Zhang Y, Guo W, Du B, et al. A critical review on membrane hybrid system for nutrient recovery from wastewater. *Chem Eng J* 2018; 348: 143–56. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.166>.
- [23] Malhotra M, Garg A. Hydrothermal carbonization of centrifuged sewage sludge : determination of resource recovery from liquid fraction and thermal behaviour of hydrochar. *Waste Manag* 2020; 117:114–23. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.026>.
- [24] Cordell D, Rosemarin A, Schroder JJ, Smit AL. Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* 2011;84:747–58. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.032>.
- [25] Ledda C, Schievano A, Salati S, Adani F. Nitrogen and water recovery from animal slurries by a new integrated ultrafiltration, reverse osmosis and cold stripping process: a case study. *Water Res* 2013; 47:6157–66. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.037>.
- [26] Song X, Luo W, Hai FI, Price WE, Guo W, Ngo HH, et al. Resource recovery from wastewater by anaerobic membrane bioreactors: opportunities and challenges. *Bioresour Technol* 2018; 270:669–77. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.001>
- [27] Corona F, Hidalgo D, Martín-Marroquín JM, Meers E. Study of pig manure digestate pre-treatment for subsequent valorisation by struvite. *Environ Sci Pollut Res* 2021; 28:24731–43. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10918-6>.
- [28] Shi L, Simplicio WS, Wu G, Hu Z, Hu H, Zhan X. Nutrient recovery from digestate of anaerobic digestion of livestock manure: a review. *Curr Pollut Rep* 2018; 4: 74–83. <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0082-z>.
- [29] Wainaina S, Awasthi MK, Sarsaiya S, Chen H, Singh E, Kumar A, et al. Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. *Bioresour Technol* 2020; 301:122778. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>.
- [30] Romio C, Kofoed MVW, Møller HB. Digestate post-treatment strategies for additional biogas recovery: a review. *Sustainability* 2021; 13:9295. <https://doi.org/10.3390/su13169295>.
- [31] Wang W, Lee DJ. Valorization of anaerobic digestion digestate: a prospect review. *Bioresour Technol* 2021; 323:124626. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124626>.



- [32] Dutta S, He M, Xiong X, Tsang DCW. Sustainable management and recycling of food waste anaerobic digestate: a review. *Bioresour Technol* 2021; 341:125915. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125915>.
- [33] Monlau F, Sambusiti C, Ficara E, Aboulkas A, Barakat A, Carr`ere H. New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives. *Energy Environ Sci* 2015; 8:2600–21. <https://doi.org/10.1039/c5ee01633a>.
- [34] Cesaro A. The valorization of the anaerobic digestate from the organic fractions of municipal solid waste: challenges and perspectives. *J Environ Manag* 2021; 280: 111742. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111742>.
- [35] Pecchi M, Baratieri M. Coupling anaerobic digestion with gasification, pyrolysis or hydrothermal carbonization: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2019; 105: 462–75. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.003>.
- [36] Chen H, Zhang W, Wu J, Chen X, Liu R, Han Y, et al. Improving two-stage thermophilic-mesophilic anaerobic co-digestion of swine manure and rice straw by digestate recirculation. *Chemosphere* 2021:274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129787>.
- [37] Di Maria F, Barratta M, Bianconi F, Placidi P, Passeri D. Solid anaerobic digestion batch with liquid digestate recirculation and wet anaerobic digestion of organic waste: comparison of system performances and identification of microbial guilds. *Waste Manag* 2017;59:172–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.039>.
- [38] Li Y, Liu C, Wachemo AC, Li X. Effects of liquid fraction of digestate recirculation on system performance and microbial community structure during serial anaerobic digestion of completely stirred tank reactors for corn stover Author links open overaly Effects of liquid fraction of dige. *Energy* 2018; 160:309–17.
- [39] Algapani DE, Qiao W, Ricci M, Bianchi D, Wandera S M, Adani F, et al. Biohydrogen and bio-methane production from food waste in a two-stage anaerobic digestion process with digestate recirculation. *Renew Energy* 2019; 130:1108–15. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.079>.
- [40] Qin Y, Li L, Wu J, Xiao B, Hojo T, Kubota K, et al. Co-production of biohydrogen and biomethane from food waste and paperwaste via recirculated two-phase anaerobic digestion process: bioenergy yields and metabolic distribution. *Bioresour Technol* 2019; 276:325–34.
- [41] Zuo Z, Wu S, Qi X, Dong R. Performance enhancement of leaf vegetable waste in two-stage anaerobic systems under high organic loading rate: role of recirculation and hydraulic retention time. *Appl Energy* 2015; 147:279–86. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.001>.
- [42] Palma L, Fernandez-Bayo J, Niemeier D, Pitesky M, VanderGheynst JS. Managing high fiber food waste for the cultivation of black soldier fly larvae. *Npj Sci Food* 2019; 3. <https://doi.org/10.1038/s41538-019-0047-7>.
- [43] Gold M, Tomberlin JK, Diener S, Zurbrugg C, Mathys A. Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: a review. *Waste Manag* 2018;82:302–18. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.022>.
- [44] Fischer H, Romano N, Sinha AK. Conversion of spent coffee and donuts by black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae into potential resources for animal and plant farming. *Insects* 2021;12. <https://doi.org/10.3390/insects12040332>.
- [45] Sprangers T, Ottoboni M, Klootwijk C, Owyn A, Deboosere S, Meulenaer B De, et al. Nutritional composition of black soldier fly. *J Sci Food Agric* 2017: 2594–600.



- [46] Peng W, Lü F, Hao L, Zhang H, Shao L, He P. Bioresource Technology Digestate management for high-solid anaerobic digestion of organic wastes : a review. *Bioresour Technol* 2020;297:122485. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122485>.
- [47] O'Brien BJ, Milligan E, Carver J, Roy ED. Integrating anaerobic co-digestion of dairy manure and food waste with cultivation of edible mushrooms for nutrient recovery. *Bioresour Technol* 2019;285. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121312>.
- [48] Hoa HT, Wang CL, Wang CH. The effects of different substrates on the growth, yield, and nutritional composition of two oyster mushrooms (*Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus cystidiosus*). *MYCOBIOLOGY* 2015; 43:423–34. <https://doi.org/10.5941/MYCO.2015.43.4.423>.
- [49] Zhong Y, Liu Z, Isaguirre C, Liu Y, Liao W. Fungal fermentation on anaerobic digestate for lipid-based biofuel production. *Biotechnol Biofuels* 2016;9:1–11. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0654-3>.
- [50] Stoknes K, Scholwin F, Krzesinski W, Wojciechowska E, Jasinka A. Efficiency of a novel “Food to waste to food” system including anaerobic digestion of food waste and cultivation of vegetables on digestate in a bubble-insulated greenhouse. *Waste Manag* 2016; 56:466–76.
- [51] Pelayo Lind O, Hultberg M, Bergstrand KJ, Larsson-Jonsson H, Caspersen S, Asp H. Biogas digestate in vegetable hydroponic production: pH dynamics and pH management by controlled nitrification. *Waste Biomass Valor* 2021; 12:123–33. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00965-y>.
- [52] Ronga D, Setti L, Salvarani C, De Leo R, Bedin E, Pulvirenti A, et al. Effects of solid and liquid digestate for hydroponic baby leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation. *Sci Hortic (Amst)* 2019;244:172–81. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.037>.
- [53] Andreasi Bassi S, Boldrin A, Frenna G, Astrup TF. An environmental and economic assessment of bioplastic from urban biowaste. The example of polyhydroxyalkanoate. *Bioresour Technol* 2021;327:124813. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124813>.
- [54] Papa G, Pep'e Sciarria T, Carrara A, Scaglia B, D'Imporzano G, Adani F. Implementing polyhydroxyalkanoates production to anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste to diversify products and increase total energy recovery. *Bioresour Technol* 2020;318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124270>.
- [55] Kovalcik A, Meixner K, Mihalic M, Zeilinger W, Fritz I, Fuchs W, et al. Characterization of polyhydroxyalkanoates produced by *Synechocystis salina* from digestate supernatant. *Int J Biol Macromol* 2017;102:497–504. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.04.054>.
- [56] Nkoa R. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agron Sustain Dev* 2014;34:473–92. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0196-z>.
- [57] Coelho JJ, Hennessy A, Casey I, Braganca CRS, Woodcock T, Kennedy N. Biofertilisation with anaerobic digestates: a field study of effects on soil microbial abundance and diversity. *Appl Soil Ecol* 2020;147:103403.
- [58] Coelho JJ, Prieto ML, Dowling S, Hennessy A, Casey I, Woodcock T, et al. Physical-chemical traits, phytotoxicity and pathogen detection in liquid anaerobic digestates. *Waste Manag* 2018;78:8–15. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.017>.
- [60] Goberna M, Podmirseg SM, Waldhuber S, Knapp BA, García C, Insam H. Pathogenic bacteria and mineral N in soils following the land spreading of biogas digestates and fresh manure. *Appl Soil Ecol* 2011;49:18–25. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.007>.



- [61] Selvaraj PS, Periasamy K, Suganya K, Ramadass K, Muthusamy S, Ramesh P, et al. Novel resources recovery from anaerobic digestates: current trends and future perspectives. *Crit Rev Environ Sci Technol* 2020;1–85. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1864957.0>.
- [62] Barłog P, Hlisnikovský L, Kunzová E. Concentration of trace metals in winter wheat and spring barley as a result of digestate, cattle slurry, and mineral fertilizer application. *Environ Sci Pollut Res* 2020;27:4769–85. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07304-2>.
- [63] Czekala W, Lewicki A, Pochwatka P, Czekala A, Wojcieszak D, Joźwiakowski K, et al. Digestate management in polish farms as an element of the nutrient cycle. *J Clean Prod* 2020;242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118454>.
- [64] Song B, Manu MK, Li D, Wang C, Varjani S, Ladumor N, et al. Food waste digestate composting: feedstock optimization with sawdust and mature compost. *Bioresour Technol* 2021;341:125759. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125759>.
- [65] Manu MK, Kumar R, Garg A. Performance assessment of improved composting system for food waste with varying aeration and use of microbial inoculum. *Bioresour Technol* 2017;234:167–77. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.023>.
- [66] Barampouti EM, Mai S, Malamis D, Moustakas K, Loizidou M. Exploring technological alternatives of nutrient recovery from digestate as a secondary resource. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;134:110379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110379>.
- [67] Song B, Manu MK, Li D, Wang C, Varjani S, Ladumor N, et al. Food waste digestate composting: feedstock optimization with sawdust and mature compost. *Bioresour Technol* 2021;341:125759. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125759>.
- [68] Wang J, Wang S. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review. *J Clean Prod* 2019;227:1002–22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>.
- [69] Wu S, He H, Inthapanya X, Yang C, Lu L, Zeng G, et al. Role of biochar on composting of organic wastes and remediation of contaminated soils—a review. *Environ Sci Pollut Res* 2017;24:16560–77. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9168-1>.
- [70] Sanchez-Monedero MA, Cayuela ML, Roig A, Jindo K, Mondini C, Bolan N. Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresour Technol* 2018;247: 1155–64. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193>.
- [71] Manu MK, Wang C, Li D, Varjani S, Xu Y, Ladumor N, et al. Biodegradation kinetics of ammonium enriched food waste digestate compost with biochar amendment. *Bioresour Technol* 2021;341:125871. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125871>.
- [72] Borkovec, O. Energetické využití odpadu ze suché a mokré fermentace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 54 s.
- [73] Cathcart, Ashley; Smyth, Beatrice M; Forbes, Christina; Lyons, Gary; Murray, Simon T; et al. *Global Change Biology. Bioenergy*; Oxford Vol. 14, Iss. 9, (Sep 2022): 1055–1064. DOI:10.1111/gcbb.12986
- [74] Pulvirenti A., Ronga D., Zaghi M., Anna Rita Tomasselli, Mannella L., Pecchioni N., Pelleting is a successful method to eliminate the presence of *Clostridium* spp. from the digestate of biogas plants, *Biomass and Bioenergy*, Volume 81, 2015, Pages 479-482, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.008>.