

Nový přístup v kvantifikaci emisí skleníkových plynů z procesu anaerobní digesce v České republice

Ivana KOPECKÁ, Petr BAŽIL, Márton BORÁROS, Miroslav HAVRÁNEK, Jiří VALTA, Zdeněk SUCHÁNEK

Česká informační agentura životního prostředí, Moskevská 1523/63, 101 00 Praha 10

e-mail: ivana.kopecka@cenia.cz, petr.bazil@cenia.cz, marton.boraros@cenia.cz, miroslav.havranek@cenia.cz, jiri.valta@cenia.cz, zdenek.suchanek@cenia.cz

Souhrn

Zpřesnění a kodifikace výpočtu emisí methanu produkovaného při anaerobní digesti odpadů jsou klíčovými kroky pro adekvátní inventarizaci celkových emisí z kategorie biologického zpracování odpadů, kterou se Česká republika zavázala plnit v rámci Národní inventarizace emisí a propadů skleníkových plynů. Nově navržená metoda zohledňuje top-down i bottom-up národní odpadová data, národně specifická aktivitní data a nejnovější poznatky o emisních faktorech založených na recentních zahraničních i domácích publikacích. Identifikovány byly hlavní zdroje úniků bioplynu v rámci bioplynové stanice, včetně návrhu postupu doplnění měřicí kampaně. Na základě dostupných informací a dat byl zpřesněn emisní faktor methanu pro Českou republiku na hodnotu 3,1 % a došlo tedy k jeho snížení oproti původní výchozí hodnotě 5 %. Tento krok přispěje ke zpřesnění a zefektivnění práce Národního inventarizačního systému, který zpracovává inventury emisí v sektoru odpadů i dalších oblastech lidské činnosti.

Klíčová slova: anaerobní digesce, inventarizace emisí, methan, odpady, odpadové hospodářství, skleníkové plyny

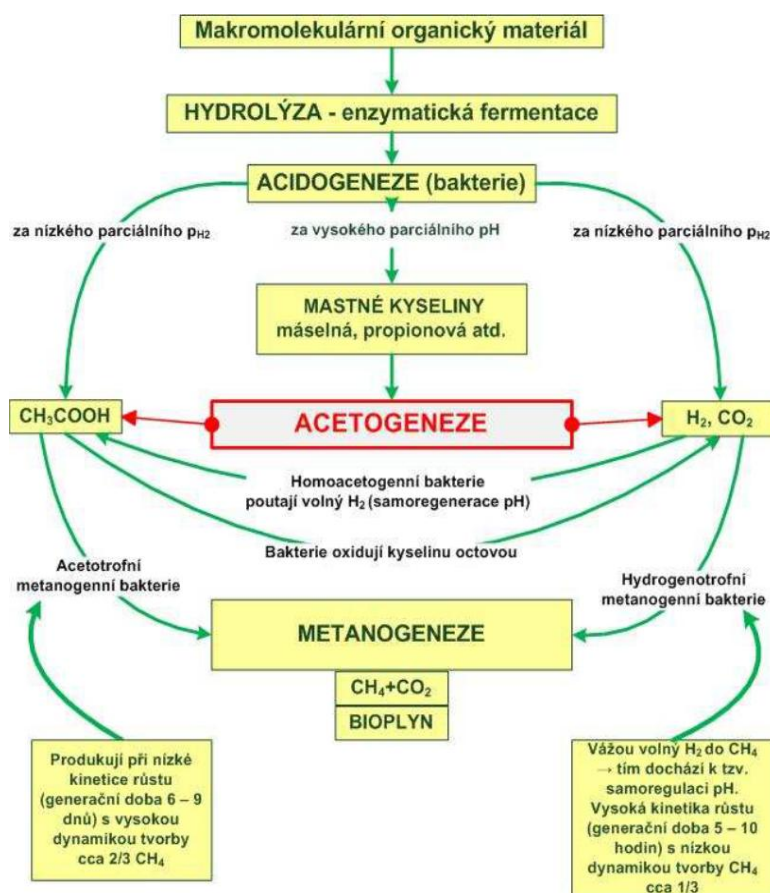
Úvod

V rámci globálního úsilí směřujícího k potlačení změny klimatu probíhá celosvětově inventarizace emisí a propadů skleníkových plynů řízená Mezinárodní rámcovou úmluvou OSN o změně klimatu (UNFCCC). Dle této úmluvy je Česká republika povinna provozovat Národní inventarizační systém (NIS) a každoročně vydávat Národní report emisí a propadů skleníkových plynů (NIR). Emise jsou inventarizovány v pěti zdrojových kategoriích dle metodiky Mezivládního panelu pro klimatickou změnu IPCC¹. Zdrojová kategorie číslo 5 se zabývá odpady a odpadovým hospodářstvím a zahrnuje také dílčí zdrojovou kategorii 5.B zaměřenou na emise ze zdrojů zpracovávajících odpad biologickými procesy – anaerobní digestí (AD) a kompostováním. Inventarizace emisí probíhá v národním měřítku a umožňuje různé úrovně přesnosti a složitosti výpočtů jednotlivých zdrojových kategorií (tzv. tiers). Základní úroveň komplexnosti (tzv. tier 1) je povinná pro všechny státy úmluvy, vyšší úrovně (tier 2 a tier 3) jsou dobrovolné podle významnosti, znalostní báze a datové základny dané kategorie.

Anaerobní digesce (anaerobní fermentace, rozklad či vyhnívání) je jedna z forem mikrobiální degradace organického materiálu bez přístupu kyslíku. Jde o řízený proces vzniku bioplynu, jehož hlavní složkou jsou dva důležité skleníkové plyny – methan (CH₄) a oxid uhličitý (CO₂). Jejich zastoupení je mezi různými provozy, kde k AD dochází, proměnlivé, ale methan je převažující složkou tvořící objemově 50 – 85 % plynu². V rámci metodiky inventarizace se vykazují emise CH₄, naopak emise CO₂ se uvádějí pouze pro informaci (tzv. memo item), protože CO₂ z procesů AD pochází z biogenního uhlíku a ten se dle principů inventarizace bere jako klimaticky neutrální. Bioplyn, který je během AD vyprodukován, se následně často využívá k výrobě tepla či elektrické energie, případně se používá jako náhrada zemního plynu v dopravě i jinde^{3,4}.

Zařízení určené k anaerobnímu rozkladu se obecně nazývá bioplynovou stanicí (BPS). Ta má, ve srovnání s kompostárnou, kde dochází k aerobnímu rozkladu organických látek, podstatně nižší

požadavky na plochu, neuvolňuje pachové emise a z odpadů lze takto získat energii⁵. Bioplynová stanice se zpravidla plní organickou hmotou průběžně, procesy vedoucí k tvorbě bioplynu tak na sebe navazují a nejsou odděleny místně ani časově. Výjimkou je rozběh stanice, případně tzv. vsádkové či víceúrovňové bioplynové stanice, kde fáze rozkladu probíhají odděleně. V takovýchto případech může iniciace tvorby methanu trvat až několik týdnů⁶. Principiálně anaerobní digesce probíhá ve čtyřech na sobě závislých fázích, během kterých směsná kultura mikroorganismů rozkládá biologicky degradovatelnou organickou hmotu^{3,7}. K základním fázím procesu patří hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze. Všechny tyto fáze většinou probíhají v plynotěsné nádrži^{8,9}, a to za současného působení různých mikroorganismů, z nichž jsou pro samotný vývoj bioplynu nejdůležitější tzv. methanogeny. Během výše uvedených fází probíhají i doprovodné procesy, které se aktivují v průběhu činnosti dalších typů mikroorganismů, jako jsou například homoacetogeny, sulfátreduktanty a nitrátreduktanty¹⁰. Odpadním produktem AD je digestát, tedy zbytek po vyhnívání, který má kašovitou konzistenci. Po ukončení rozkladného procesu se shromažďuje ve skladovacích nádržích a může být použit jako hnojivo. Je-li proces anaerobní digesce veden správně, a i ostatní technologické kroky jsou bez závad, pak digestát nezapáchá a obsahuje v průměru 4 – 8 % sušiny. Po odseparování pevného podílu z digestátu vzniká tzv. separát (tuhý zbytek) a fugát (tekutý zbytek). I obě tyto složky lze použít jako hnojivo. Nevyužité živiny tak mohou být vráceny do půdy⁸. Stručné grafické schéma procesu anaerobní digesce je uvedeno v obrázku 1¹¹. Specifikace a seznam biologicky rozložitelných odpadů s ohledem na proces anaerobní digesce je pak uveden ve Vyhlášce č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.



Obrázek 1: Grafické schéma průběh čtyřfázové anaerobní fermentace (převzato z cit.¹¹)

Inventarizace emisí skleníkových plynů z anaerobní digesce (vedená dle IPCC metodik¹ jako dílčí zdrojová kategorie 5.B.2.) pracuje s predikamentem, že emise z národních procesů AD se počítají jako funkce hmotnostních vstupů do procesů AD v kombinaci s příslušným emisním faktorem (EF), tedy

koeficientem popisujícím rychlost, s jakou daná činnost uvolňuje do atmosféry skleníkové plyny. Toto zjednodušení (tzv. top-down approach) nepostihuje komplexní realitu na jednotlivých stanicích, které je možné počítat jednotlivě na základě specifických parametrů a kumulativně do inventury načítat (tzv. bottom-up approach). Problémem je pracnost a datová náročnost tohoto postupu, zejména při předpokladu, že emise z této kategorie by neměly být velké, protože se jedná o kontrolovaný proces, jehož cílem je výroba, zpracování a jímání bioplynu. Je považováno za vhodné pokusit se při výpočtu emisí z kategorie 5.B.2. o kombinaci obou přístupů.

Cílem postupu navrženého v této práci je zpřesnit a kodifikovat metodu výpočtu emisí methanu ze zdrojové kategorie 5.B.2 Biologické zpracování odpadů – anaerobní digesce. Nová metoda zohledňuje top-down i bottom-up národní data, národně specifická aktivitní data a nejnovější poznatky o emisních faktorech, resp. únicích, založené na recentních publikacích. Práce tak má přispět k celkovému zpřesnění hodnot emisí skleníkových plynů vykazovaných v rámci celého Národního inventarizačního systému. Dílčím cílem pak je snaha posunout odbornou debatu a znalosti o emisní situaci v ČR a přispět, byť v limitovaném segmentu, k mezinárodní diskusi o emisích skleníkových plynů ze sektoru odpadů. V neposlední řadě je cílem navržené metody přispět k zefektivnění vlastní práce národních sektorových expertů, kteří zpracovávají inventury v oblasti odpadů v rámci NIS, a budou tak moci odhady této zdrojové kategorie zkvalitnit.

Experimentální část

Defaultní metodika

Dle základní metodiky IPCC¹ (tier 1) se postup výpočtu emisí methanu z AD řídí rovnicí, kde hlavními třemi parametry jsou hmotnost odpadu zpracovávaného AD, emisní faktor pro tento typ technologie a odečítá se množství methanu jímaného z provozu, případně flérováno či jinak cíleně zneškodněného (rovnice 1):

$$CH_4_{emise} = \sum_i (M_i \times EF_i) \times 10^{-3} - R \quad (1)$$

kde: CH_4_{emise}	emise methanu [Gg/rok]
i	typ nakládání s odpady (anaerobní digesce)
M	je hmotnost organického odpadu odstraňovaného metodou i [t]
EF	emisní faktor pro typ nakládání i a R [g CH_4 /kg zpracovaného odpadu]
R	množství jímaného methanu [Gg/rok]

Datová základna

V podmínkách ČR se jedná o data nakládání s odpady zpracovávaná Českou informační agenturou životního prostředí (CENIA), data Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO) ze statistického šetření o využívání Obnovitelných zdrojů energie (OZE) a defaultní hodnoty uvedené v manuálu IPCC¹ pro danou technologii. Hodnota R může být někdy problematická, protože data o jímaném plynu nezohledňují, zda plyn pochází čistě z odpadů, nebo i z jiné vsázky (zemědělské koprodukty a rezidua, kaly apod.) a použitím tohoto tier 1 pro podmínky ČR vychází hodnoty emisí, které jsou na jednotku zneškodněného odpadu (tzv. implied emission factors) řádově jiné než ve světě a než je teoreticky možné, nebo se dokonce dosahuje negativních emisí. Bioplynové stanice v ČR velmi často využívají kromě odpadu i další materiály a hodnota R tedy přesahuje potenciální množství, které se získá výpočtem z vsázky pouhého odpadu. Možným řešením by bylo do parametru M zahrnout i ostatní vstupy, protože se ale jedná o produkty – výrobky/materiály, nikoliv odpady, zákonná povinnost tyto ostatní vsázky evidovat neexistuje. V národním měřítku tak tato data nejsou dostupná. Navržena proto byla upravená národní metoda výpočtu, která tento problém zohledňuje a přispívá tak ke snížení výsledné nejistoty vypočtené hodnoty.

Národní metodika pro zdrojovou kategorii 5.B.2 Anaerobní digesce

Národní metodika anaerobní digesce vychází z principů IPCC¹ a byla dle národní potřeby upravena do následujícího matematického zápisu, který je dále konkretizován (rovnice 2):

$$CH_4\text{ emise} = \sum_i R \times U \times GWP_{CH_4} \quad (2)$$
$$R = \frac{E_{bp}}{50,009}$$
$$U = \frac{\sum_{s=n} U}{n}$$

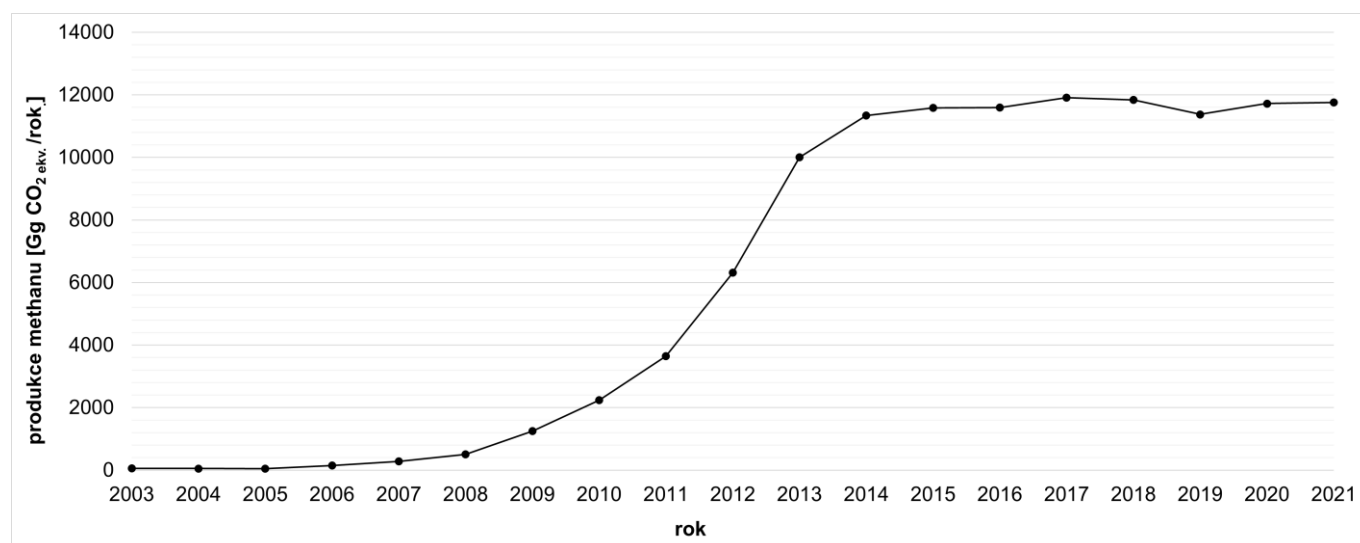
$CH_4\text{ emise}$	emise methanu [Gg $CO_2\text{ ekv.}/rok$]
GWP_{CH_4}	faktor globálního ohřevu methanu popisující, kolikrát je CH_4 efektivnější skleníkový plyn než CO_2 (cit. ¹)
R	množství methanu jímaného provozovatelem bioplynové stanice i (Gg CH_4/rok)
U	faktor úniku, zlomek popisující únik v poměru k vyrobenému/jímanému methanu (bezrozměrný zlomek)
E_{bp}	energie paliva – spalné teplo (TJ)
50,009	výhřevnost methanu (TJ/Gg)

Výsledky a diskuze

Množství jímaného methanu R

Informace o bioplynu jsou každoročně získávány z Oddělení analýz a datové podpory koncepcí (Odbor strategie a mezinárodní spolupráce v energetice) MPO v podobě produkce energie obsažené v palivu v joulech. Energie obsažená v palivu je ekvivalentem fyzikální veličiny spalného tepla. To je nutno nezaměňovat s výhřevností, což je spalné teplo umenšené o kondenzační energii vody ve spalinách. Protože emisní inventury jsou vedeny v hmotnostních jednotkách, je nutné převést energii obsaženou v palivu na hmotnost paliva, resp. hmotnost methanu. Složení bioplynu se liší zdroj od zdroje, ale všeobecně lze o bioplynu jakékoli výhřevnosti či spalného tepla říci, že jeho hlavní část tvoří methan. Bioplyn sice může obsahovat různé příměsi (například oxid uhelnatý, sloučeniny síry), které teoreticky oxidovatelné jsou a mohou přispívat ke spalnému teplu bioplynu jako celku, ale tento příspěvek je zanedbatelný v porovnání s methanem. Pro účely výpočtu se tedy pracuje s předpokladem, že jediný zdroj energie měřitelný jako spalné teplo je v bioplynu methan. Přes teoretické spalné teplo čistého methanu (50,009 TJ/Gg) se tak dopočte teoretická hmotnost methanu, který byl jímán provozovateli bioplynových stanic. Tento methan zahrnuje i methan, který vznikl anaerobní digescí jiných materiálů než odpadů, nicméně vzhledem k tomu, že do výpočtu nyní nevstupují odpady jako hmotnostní tok, dává výsledek větší smysl než při aplikaci defaultní metodiky dle rovnice 1. Problém nastíněný v kapitole **Datová základna** však do jisté míry přetrvává a je diskutován dále. Ilustrativní produkce methanu obsaženého v bioplynu z BPS v ČR v letech 2003 – 2021 je znázorněna v obrázku 2.

Data o odpadech zpracovaných BPS jsou dostupná jako data o množství odpadu přijatého bioplynovými stanicemi z databáze Informačního systému odpadového hospodářství (ISOH), kterou spravuje CENIA. Jedná se ale pouze o data k bioplynovým stanicím zpracovávajícím odpad, který prošel evidencí odpadového hospodářství, jiná data zahrnutá nejsou. Především z tohoto důvodu data z ISOH posloužila jen pro potřeby tvorby úpravy metody a její ověření, kdy výpočty na základě hmotnostního toku byly použity jako metoda ověření (tzv. check method), že výsledky navrhované upravenou metodou budou ve stejném řádu, byť se číselně budou lišit. Použití metody ověření je dobrou praxí dle IPCC¹.



Obrázek 2: Produkce methanu obsaženého v bioplynu z BPS v ČR v letech 2003 – 2021

Zdroje úniků bioplynu z BPS

Záznamy o konkrétních zdrojích uniklých emisí (např. v rámci jednotlivých provozních budov bioplynových stanic, při různých způsobech skladování biomasy, z vad na potrubním vedení apod.) jsou minimální a literatury, která by se tímto fenoménem zabývala takto do hloubky v rámci ČR, je velmi omezené množství. Obecnou představu o hlavních zdrojích úniků a jejich podílu na celkových emisích je zčásti možné si utvořit na základě studií a dat ze zahraničí.

Plynové hospodářství stanice by mělo být za normálního provozu nastaveno tak, aby ztráty tohoto systému byly zanedbatelné (v řádu desetin % celkové výroby)¹². Za nestandardních situací však k únikům methanu docházet může, a to jak náhodně (chyby v obsluze zařízení, neoptimalizované nastavení procesu, úniky na vstupech, výstupech i potrubí)^{13,14}, tak úmyslně. K tomu dochází zejména v situaci, kdy množství vyprodukovaného methanu/bioplynu převyšuje poptávku. Podobná praxe byla doložena především v některých rozvojových zemích (např. Indie, Pákistán), kde data naznačují, že emise methanu z domácích bioplynových zařízení mohou dosahovat až 40 %, což zhruba odpovídá ztrátě 4,5 Tg/rok, tedy 1 % globálních emisí či 10 % emisí z produkce rýže¹⁵. Množství takto uvolněných emisí se navíc může lišit v závislosti na podnebí. Roční emise CH₄ ze zařízení s objemem 2 m³ mohou být až 53,2 kg CH₄/rok v regionech s teplým podnebím a 22,3 kg CH₄/rok v regionech s chladnějším podnebím. Hodnoty byly vypočteny pro předpokládanou produkci 0,4 m³ bioplynu/m³ plochy fermentoru/den, což odpovídá ztrátě 17 %, resp. 14 % bioplynu^{14,15}. Pomocí tzv. break-even analýzy bylo dokonce doloženo, že emise z anaerobní digesce v malých bioplynových stanicích (tj. typicky s objemem 6 – 10 m³ a produkcí 0,1 – 0,3 m³ plynu/m³ objemu fermentoru/den) mohou být natolik velké, že negativní dopad na globální oteplování převáží potenciální úspory plynoucí ze sníženého spalování tradičních paliv. V závislosti na typu nahrazovaného paliva může tento „zlom“ nastat, uvolní-li se 3 - 51 % vyprodukovaného bioplynu¹⁵.

Koncové sklady digestátu, kde může docházet ke zbytkovému vývinu methanu, jsou dalším významným zdrojem jeho emisí v případě, kdy nejsou dostatečně plynotěsně zakryty. Produkce digestátu v BPS může být v některých případech značná. Na každou vyprodukovanou megawatthodinu (MWh) el. energie připadá vyprodukování cca 2 t digestátu v závislosti na složení vstupního substrátu a procesních podmínkách¹⁶. V součtu s emisemi uvolněnými při delších výpadech spotřeby, například při poruchách či plánovaných odstávkách kogenerační jednotky, jsou ztráty methanu ze skladování digestátu mnohdy významné a mohou dosahovat až jednotek procent roční výroby bioplynu¹². Doloženy jsou i případy, kdy díky zdržení substrátu v neodpovídajících fermentorech a zároveň nedostatečně uzpůsobených skladech digestátu z hlediska plynotěsnosti, může docházet k emisím CH₄ tak vysokým, že je ve výsledku negativně ovlivněn plánovaný ekologický přínos takového zařízení k omezení a bilanci

emisí ekvivalentu CO₂. Úniky methanu se v těchto případech mohou pohybovat na úrovni odpovídající 30 – 50 % emisního faktoru pro produkci elektřiny při spalování uhlí^{12,17}. Naproti tomu v případě krytých nádrží s digestátem a anaerobních lagun bylo Mezivládním panelem pro změnu klimatu ve zprávě o offsetových metodologiích doporučeno předpokládat 0 – 5 % fugitivních emisí z těchto zařízení¹⁸.

Studie provedená pod záštitou Dánské energetické agentury a tamního ministerstva ukázala, že jednotlivých zdrojů úniků CH₄ může být i v případě některých zařízení v Evropě opravdu velké množství¹⁹. Ve 4 sledovaných BPS bylo identifikováno od 8 do 16 jednotlivých zdrojů emisí, zároveň se ale prokázalo, že většina emisí vždy pochází pouze z několika málo z nich. Jedná se zejména o již výše zmíněný otevřený sklad digestátu (53 % emisí v rámci dané BPS), což je v souladu s předchozími studii o emisích CH₄ ze zařízení s otevřenými skladovacími nádržemi digestátu^{20,21}. Dalším významným zdrojem emisí může být plynový motor (45 % emisí z dané BPS), kogenerační jednotka (38 % emisí z dané BPS), dále odvětrávací systém budovy (často vč. biofiltru), nádrže pro příjem a míchání biomasy či jednotka pro úpravu bioplynu. Celkově se emise z jednotlivých BPS podařilo v této studii pomocí dálkového průzkumu země (DPZ) stanovit v rozmezí 5,5 – 13,5 kg CH₄/h, což odpovídalo ztrátě 1,4 – 8,3 % produkce CH₄. Souhrnný průměr (součet emisí všech čtyř BPS/součet výroby všech čtyř BPS) byl 2,7 %, což je srovnatelné se ztrátami 3,1 % hlášenými ze zemědělské BPS²² a 0,6 – 2,1 % z BPS zpracovávající čistírenské kaly²¹.

Faktor úniku – U

Výpočet emisí pomocí upravené metody spočívá ve vynásobení dat o vyprodukovaném bioplynu faktorem úniku (U). Emise skleníkových plynů by měly být založeny na sumarizaci možných úniků v rámci celého areálu bioplynové stanice, případně i na poruchách či haváriích. Dle metodiky IPCC¹ se zpravidla jedná o 0 – 10 % vyprodukovaného methanu. V případě, že daný stát nemá vlastní národní data, pak je doporučováno využít jako defaultní hodnotu 5 %. Tento postup je v rámci metodiky IPCC¹ popsán v odstavci o anaerobní digestaci v podkapitole 4.1 Methodological issues. Jak ale ukazuje tabulka 1, kvantifikované emise se ve skutečnosti mohou pohybovat i v mnohem širším rozmezí. Řada států proto přistupuje ke stanovení vlastního faktoru, který je specifitější. Tomuto postupu většinou předchází měřicí monitorovací kampaň v jednotlivých typech BPS, podložená ještě například podrobnou rešerší dostupných literárních a datových zdrojů.

Za účelem získání přesnějších faktorů úniku pro CH₄ než IPCC defaultních¹ byla nejprve prověřena IPCC databáze emisních faktorů EFDB²⁷. Databáze poskytla vhodnou studii z Německa²⁵, ve které byla pro stanovení emisí methanu z bioplynové stanice v Porýní-Falcku použita metoda dálkového průzkumu země. K odvození míry emisí byl použit model inverzní disperze. Tato technika vyžaduje jedno měření koncentrace methanu pomocí otevřeného laserového absorpčního spektrometru (TDLAS) po větru a proti větru od zdroje, a základní informace o větru, jako je rychlost a směr větru. V nerušených provozních režimech dosahovaly emise methanu v průměru 2,8 g/s, což odpovídá 4 % produkce methanu dané bioplynové stanice. Další relevantní údaje byly zjištěny z NIR Německa vydané v roce 2021²⁸. Pro reporting emisí methanu z AD využívá Německo národní EF = 2,800 kg CH₄/kt bioodpadu, což odpovídá ztrátě 5,7 % z celkové produkce methanu. Tento specifický faktor byl stanoven na základě monitorovacího projektu²⁹, v němž byly kalkulovány emise pocházející ze zařízení na digestaci biologického odpadu, který primárně tvoří odděleně sbíraný biologický odpad z domácností, potravinový odpad z jídelen a restaurací a biologický odpad z výroby a zpracování potravin. Nezahrnují se emise z vyhnívání čistírenských kalů.

Technikou inverzní disperze byly měřeny fugitivní emise methanu z bioplynové stanice i v jiných studiích²². Sledované zařízení v Kanadě využívá anaerobní digestaci za účelem výroby bioplynu (z hnoje dobytka a jiných organických surovin), který se následně spaluje s cílem vyprodukovat elektřinu (kapacita 1 MW) a teplo. Jedná se tedy o waste-to-energy proces, celkové emise z něj jsou reportovány v rámci energetické kategorie inventarizace, nicméně uvedená metoda měření a zjištěné hodnoty se pro srovnání využít dají. Fugitivní emise související s provozem BPS během čtyř sezónních kampaní byly v průměru stanoveny na 3,2, 0,8 a 26,6 kg CH₄/h pro období normálního provozu, období údržby, resp. období flérování. Při běžném provozu odpovídalo průměrné množství fugitivních emisí 3,1 % celkové produkce methanu.

Tabulka 1: Přehled studií kvantifikujících emise methanu z BPS pomocí různých metod (převzato z cit.²³ a doplněno o další relevantní studie)

Zdroje emisí	Typ měření	Metoda měření	Ztráty methanu	Zdroj
Nezakrytá dobytčí kejda v BSP	na místě	Metoda uzavřené komory	87 – 176 g m ⁻² d ⁻¹	23
Příkrmovací komora BPS	na místě	Metoda uzavřené komory	7 – 120 g m ⁻² d ⁻¹	14
Prasečí a kravská kejda	na místě	Dynamická FTIR spektrometrie v otevřené komoře	16 %	23
Kravská ekologická farma	na místě	Metoda disperze trasovací látky (SF6)	35 C g m ⁻³ d ⁻¹ (10 %)	23
Prasečí farma	DPZ	Metoda inverzního disperzního modelování s využitím laserové spektroskopie (TDLAS) a zpětného Lagrangeova stochastického modelu	3 203 gfar m ⁻¹ d ⁻¹	23
BSP zpracovávající statkový hnůj	na místě	Offsetové metody	0 – 5 %	24
Zemědělská BPS	DPZ	Metoda inverzního disperzního modelování s využitím laserové spektroskopie (TDLAS) a zpětného Lagrangeova stochastického modelu	3,2 kg h ⁻¹ (3,1 %)	2
10 zemědělských BPS s kogenerační jednotkou	na místě	Spektroskopická (TDLAS) a plameno-ionizační (FID) detekce netěsností; kvantifikace emisí z jednotlivých zdrojů s využitím metody statické a dynamické komory	0,40 – 3,28 %	20
ČOV	DPZ	Metoda disperze stopovacího plynu s jeho řízeným uvolňováním	2,07 – 32,7 %	23
Bioplynové stanice	DPZ	Metoda inverzního disperzního modelování s využitím laserové spektroskopie (TDLAS) a zpětného Lagrangeova stochastického modelu	7,2 kg h ⁻¹ (4 %)	23
Bioplynová stanice	DPZ	Metoda inverzního disperzního modelování s využitím laserové spektroskopie (TDLAS) a zpětného Lagrangeova stochastického modelu	2,8 g s ⁻¹ (4 %)	25
Provoz tlakových ventilů BPS	na místě	Explozi odolný snímač rychlosti proudění	3,88 %	23
BPS zpracovávající kravský hnůj a potravinářské odpady	DPZ	Metoda inverzního disperzního modelování s využitím laserové spektroskopie (TDLAS) a zpětného Lagrangeova stochastického modelu	19 g d ⁻¹ (12 %)	23
BPS zpracovávající organický odpad	DPZ, na místě	Měření pomocí pozemního dálkového průzkumu a velkoobjemového vzorkovače	5 – 25 kg h ⁻¹ (0,6 – 3 %)	21
Mokrý proces čištění spalin BPS	na místě	Analyzátor plynu	9,90 %	23
Zařízení na zpracování biologického odpadu	DPZ	Metoda disperze stopovacího plynu s jeho řízeným uvolňováním	30,1 kg h ⁻¹	23
ČOV	DPZ	Metoda disperze stopovacího plynu s jeho řízeným uvolňováním	1 – 21 %	23
Skladovací nádrže s digestátem (hnůj)	DPZ	Mikrometeorologická metoda hmotnostní bilance	76 g kg ⁻¹	23
4 BSP (3 zemědělské a 1 jako součást ČOV)	na místě i DPZ	Metoda disperze stopovacího plynu s jeho řízeným uvolňováním	5,5 – 13,5 kg h ⁻¹ (1,4 – 8,3 %)	19
9 BPS s jednotkou na čištění bioplynu	na místě	Vzorkování a analytická měření	0,04 – 1,7 %	23
13 BPS zpracovávající ČOV kaly	na místě	Metoda disperze stopovacího plynu s jeho řízeným uvolňováním	7,5 %	26
10 BSP zpracovávající zemědělský a organický odpad	na místě	Metoda disperze stopovacího plynu s jeho řízeným uvolňováním	2,4 %	26

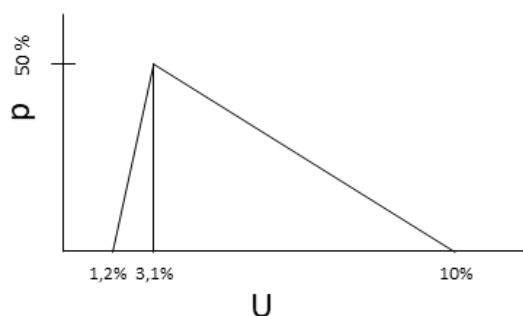
Pozn.: FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) – Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací, SF6 (Sulphur hexafluorid) – fluorid sírový, TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption spectroscopy) – Nastavitelná diodová laserová absorpční spektroskopie, FID (Flame Ionization Detection) – Plamenoionizační detekce, DPZ – Dálkový průzkum země, ČOV – Čistírna odpadních vod.

Své vlastní emisní faktory mají dále například i Dánsko 4,2 %³⁰, Švýcarsko 1 – 2,5 % s poznámkou, že měření v místě bioplynových stanic neprokázalo závislost mezi množstvím vyprodukovaného bioplynu a unikajícími emisemi, průměrný unik byl v tomto případě stanoven na hodnotu 1,23 t methanu z BPS za rok³¹, dále Japonsko 2 % úniku při podílu methanu v bioplynu 60 %³², Lucembursko 3,1 %³³. Naopak sousední Rakousko do roku 2015 využívalo stejně jako ČR defaultní EF 5 % z produkce bioplynu. Předpokladem však je, že v horizontu let 2016 až 2030 bude únik emisí postupně klesat tak, aby se ustálil na hodnotě 1 %. Důvodem tohoto předpokládaného trvalého poklesu je zavedení legislativního nařízení, které stanovuje, že pro získání povolení k výstavbě nové BPS je nutnost zajistit plynotěsnost zásobníků i uskladňovacích tanků. Vzhledem k tomu, že průměrná životnost bioplynové

stanice je odhadována na 15 let, lze očekávat, že do roku 2030 budou v provozu pouze plynotěsné bioplynové stanice. Stále se však bude předpokládat únik ve výši 1 % a to i po roce 2030³⁴.

Na základě provedené rešerše je patrné, že datová základna konkrétních měření emisí methanu z AD v zahraničí existuje. Stanovené národní emisní faktory se však značně liší. Množství datových zdrojů o konkrétních únicích methanu z provozu jednotlivých BPS v ČR je naopak považováno za omezené. Dle dostupných informací se nepodařilo doložit, že by v rámci ČR byl dosud proveden dlouhodobější experimentální či provozní monitoring emisí z AD odpadů, který by poskytl datovou základnu pro výpočet reálně uniklých emisí. Na základě těchto hodnot by pak bylo možné po vzoru řady evropských zemí upravit národní emisní faktor a při výpočtech ho poté používat místo defaultně stanovené hodnoty 5 %.

Na základě výše uvedených data a stanovisek lze demonstrovat, že doporučená default hodnota pravděpodobně převyšuje reálné úniky v průmyslově vyspělých zemích. Zde se pro řádně provozované stanice pohybují emise mezi 1,2 % (Japonsko) až po 4,2 % (Dánsko). Pro Českou republiku by tedy mělo být dobrou praxí používat nižší faktor úniku, než je doporučená základní hodnota. Jako nejpravděpodobnější hodnotu na základě dostupných pramenů bylo navrženo používat střední hodnotu mezi hodnotou základní (5 %) a nejnižší hodnotou (1,2 % Japonsko) s tím, že rozptyl tohoto faktoru bude zohledněn v nejistotě (detailně rozepsáno v kapitole metodiky IPCC Uncertainty management¹). Navrženo bylo rozdělení pravděpodobnosti parametru U jako jednoduchou trojúhelníkovou funkci s mezními hodnotami 1,2 %, nejpravděpodobnější hodnotou s 50 % pravděpodobnosti na hodnotu 3,1 % a druhou mezní hodnotou na 10 % (Obrázek 3). Zároveň je třeba důrazně konstatovat, že národní specifický emisní faktor je třeba přesně vyčíslit dle výsledků vlastní měřicí kampaně, která dosud chybí.



Obrázek 3: Navrhované rozdělení pravděpodobnosti (p) faktoru úniku (U)

Dvojitý započítávání a nejistota

Inventarizace emisí skleníkových plynů ze sektorů odpadů je obecně zatížena velkými nejistotami. Metodika IPCC¹ odhaduje, že nejistota kategorie v absolutní hodnotě má rozmezí +/- 40 %, což se na rozdíl od energetiky (+/- 3 %) může zdát hodně, ale tato nejistota pramení z obrovské heterogenity procesů v odpadovém hospodářství, roztržitěné datové základny s neharmonizovanými daty a postupy a také z ne vždy přesné znalosti biologických postupů stojících za zdrojovými kategoriemi (např. emise N_2O z vody). Navíc v oblasti odpadů jsou některé zdrojové kategorie natolik malé (např. kompostování), že náklady na provedení přesné a detailní inventury bottom-up přístupem by mohlo sice snížit nejistotu kategorie, ale za cenu enormních nákladů. V případě, kdy významnost této kategorie je minimální, je z pohledu omezených zdrojů racionální alokovat zdroje na zpřesnění do kategorií, které jsou klíčové. I z tohoto důvodu velmi často není cílem inventarizace emisí skleníkových plynů přijít s absolutní přesnou hodnotou, ale spíše s nejpravděpodobnějším odhadem, a tento transparentně komunikovat na mezinárodní úrovni.

Kategorie AD není považována za zcela bezvýznamnou. Nepatří sice mezi klíčové zdrojové kategorie, tedy kategorie, které v kumulativním součtu od největšího k nejmenšímu tvoří 95 % národní inventury. V budoucnu ale lze očekávat nárůst jejího významu z důvodu podpory využívání obnovitelných zdrojů energie (bioplyn) a také s implementací Plánu obnovy (Recovery Plan) a Zelené

dohody (Green Deal), kdy lze očekávat nárůst objemu AD instalací na našem území. V rámci Zelené dohody by se v Evropě měly postupně zahrnout pod systém emisního obchodování (EU ETS) i další sektory nad rámec stávajících a odpadové hospodářství je jedním z takto diskutovaných sektorů. Evropská zelená dohoda také stanovuje závazné indikátory na snížení emisí z tohoto sektoru. Z těchto důvodů je nutné mířit k vyšším tiers inventarizace a zpřesňovat odhady emisí z této zdrojové kategorie.

Na výstupu z BPS není možné oddělit bioplyn vzniklý z odpadů a bioplyn vzniklý například z kalu či zvířecích exkrementů, proto může docházet ke dvojímu započítání této části emise i v jiné části inventarizace (např. kategorie 5.D nakládání s odpadními vodami či 3.B zemědělství). Na základě průzkumu dat i znalosti metodiky se nezdá, že by toto potenciální dvojí započítání významně ovlivnilo výsledek nad rámec inherentní nejistoty, kterou tato kategorie má, ale při implementaci této metodiky do NIS je nutné tento aspekt konzultovat s příslušnými sektory, kde je anaerobní zneškodňování kalu ošetřeno parametricky (např. zdůvodněným snížením rozmezí faktoru).

Návrh metodiky sběru dat o únicích methanu z bioplynových stanic

S ohledem na rostoucí význam AD je vhodné zvážit naplánování a provedení experimentálního monitoringu emisí methanu ve vytipovaných BPS, např. pro různé kategorie BPS dle jejich výkonu, který lze v ČR očekávat v rozsahu cca 100 kW – 1200 kW. Vhodné je experimentálně podložit i úniky methanu v rámci jednotlivých částí BPS. Zejména u skladu digestátu lze očekávat rozdíly v závislosti na tom, jak je takový sklad konstruován, a zda je plynotěsně zakryt či nikoliv. Experimentální monitoring by měl proběhnout i při různých módech chodu BPS (období flérování vs. standardní chod). Monitoring by bylo možno nastavit například dle metodik využitých ke zpřesnění EF okolními státy či publikovanými v renomovaných mezinárodně recenzovaných periodících. Příkladem může být inverzní disperzní technika^{22,25}, monitorovací výzkumný projekt provedený v Německu²⁷, či další metody uvedené v tabulce 1.

V případě, že by se na základě měřicí monitorovací kampaně, nutně doplněné i o state-of-the-art review dostupné literatury k problematice emisí skleníkových plynů z AD odpadů, podařilo zjistit reálné úniky emisí methanu, bylo by možno stanovit ještě přesnější národní EF a ten následně využít pro výpočet celkových emisí methanu. V rámci měření by měly být postihnuty zejména tyto části BPS/situace:

- digestát a prostory pro jeho skladování
- množství uniklého plynu při startování a provozu kogenerační jednotky
- množství uniklého plynu při startování a provozu fléry
- potrubní rozvody
- bioplynový reaktor a související rozvody
- havarijní úniky
- skladování materiálu (vstupního, výstupního)
- další zařízení specifická pro danou BPS, kde by mohlo docházet k únikům

Měření je nutno provést na několika stanicích obdobné konstrukce a provozu, případně na různých zařízeních ve více opakováních a za příznivých meteorologických podmínek. Pro zajištění aktuálnosti hodnoty EF je nutno měření po několika letech (např. pěti), nebo po významných legislativních či technologických změnách, opakovat.

Ekonomické aspekty

Technologie anaerobní digesce je jedním z pilířů pro dosažení principů oběhového hospodářství v sektoru nakládání s komunálními a biologicky rozložitelnými odpady, což má reálné pozitivní ekonomické dopady. Intenzivnějším využitím této technologie lze dosáhnout přesunu části odpadů produkovaných municipalitami, občany a potravinářskými a zemědělskými podniky ze skládek či dalších méně ekologických způsobů odstranění/využití směrem k technologii, na jejímž konci je ekonomicky zhodnotitelný produkt/služba (např. el. energie, vytápění). Produkovaný bioplyn je hlavním finančním příjmem BPS, provozovatelé jsou proto vysoce motivováni k maximálnímu využití energetického

potenciálu produkovaného bioplynu a minimalizaci jeho úniků jak v samotné technologii, kdy musí být potenciální úniky na co nejnižší úrovni v souladu s principy správné provozní praxe a technickými normami, tak z jednotlivých součástí BPS (např. úniky reziduálního bioplynu z digestátu). Obecný předpoklad, že úniky jsou zcela minimální, je hlavním důvodem, proč dosud nebylo prováděno systematické sledování zbytkového bioplynu při obligatorních měřeních souvisejících s environmentálními povoleními provozu příslušných zařízení. Realizace navržených způsobů měření bude vyžadovat zajištění finančních prostředků pro provedení měřicí kampaně, která bude základem pro výpočet národního EF.

Závěry

Navržená metoda výpočtu emisí methanu z procesu anaerobní digesce odpadů (kategorie 5.B.2) povede k výraznému zpřesnění inventarizace emisí skleníkových plynů. Příprava rešeršní části práce nicméně odhalila, že na území ČR dosud nebyl proveden vlastní monitoring, na základě něhož by byl stanoven přesný národně-specifický emisní faktor, který by umožnil inventarizaci na nejvyšší úrovni (tier 3). Ke zpřesnění (hodnota uvedená v kapitole **Výsledky a diskuze**) bylo naopak přistoupeno pouze na základě zhodnocení kampaní a naměřených dat ze zahraničí. V návaznosti na tato zjištění je doporučeno provedení vlastní reprezentativní série měření množství reziduálního methanu na BPS v ČR zejména v digestátu a jeho skladech, resp. dalších zdrojích v rámci BPS, které byly v této práci identifikovány jako významné. Předpoklad minimálního reziduálního množství methanu v digestátu by měl být ověřen i z důvodu ekonomického tlaku na provozovatele BPS k maximálnímu energetickému využití vyprodukovaného plynu v kogeneračních jednotkách příslušné BPS. Následně bude možné dle postupu popsáno v této práci opětovně revidovat faktor úniku (U) a tedy i celkovou emisi.

Oblast AD odpadů není, v porovnání s jinými kategoriemi, v rámci metodik IPCC příliš do detailů rozpracována. Nově navržená metoda tedy může sloužit jako návod i pro ostatní země, jak kalkulaci emisí z AD zpřesnit a jak postupovat v případě snahy o zavedení národního EF.

Poděkování

Tato práce vznikla v rámci řešení projektu TK 02010056 Rozvoj metodik pro reporting emisí a propadů skleníkových plynů a jejich projekcí, včetně projekcí emisí tradičních polutantů (MEMORESP, 2019-2023), který byl spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu THĚTA.

Literatura

1. IPCC: *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Vol. 5 Waste. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006.
2. Straka F. a autorský kolektiv: *Bioplyn. Příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*, GAS s.r.o., Praha 2003.
3. Zhang Q., Jianjun H., Duu-Jong L.: *Renewable Energy* 98, 108 (2016).
4. Albuquerque J. A., De La Fuente C., Ferrer-Costa A.: 2012. *Biomass Bioenergy* 40, 181 (2012).
5. Kuraš M.: *Odpady, jejich využití a zneškodňování*, Český ekologický ústav, Praha 1994.
6. Červená K., Lyčková B., Kučerová L., Bouchalová M., Barabášová T.: *Anaerobní digesce. Biologické metody zpracování odpadů*, VŠB – TUO, Ostrava 2007. <http://hgf10.vsb.cz/546/bmzo/pages/index.html>
7. Koudřa J.: *Bioplynové stanice s mokřým procesem*, Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT), Informační centrum ČKAIT, Praha 2008.
8. Tenza: *Bioplynové stanice*, TENZA, Brno 2017. <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/energeticke-stavby/bioplynove-stanice/>

9. Ochodek T., Koloničný J., Branc M.: *Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy: studie v rámci projektu "Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy"*, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2007.
10. Straka F., Ciahotný K.: *Bioplyn. Příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*. 3. zkrác. vyd., GAS, Praha 2010.
11. Karafiát Z., Vítěz T.: *Biogas transformation of liquid substrates*, výzkumná zpráva, Mendelova univerzita v Brně, Brno 2009.
https://mnet.mendelu.cz/mendelnet09agro/files/articles/tech_karafiata.pdf
12. SEVEn Středisko pro efektivní využívání energie: *Energetická efektivnost bioplynových stanic – Možná opatření pro vyšší stupeň využití bioplynu*, SEVEn 2011. <https://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/EnEfBPS-komplet.pdf>
13. Nazir M.: *Bioresource Technology* 35, 289 (1991).
14. Khoiyangbam R. S., Kumar S., Jain M. C., Gupta N., Kumar A., Kumar V.: 2004. *Bioresource Technology* 95, 35 (2004).
15. Brunn S., Jensen L. S., Vu V. T. K., Sommer S.: *Renewable Sustainable Energy Rev.* 33, 736 (2014).
16. Dítl P., Nápravník J., Šulc R.: *Biomass and Bioenergy* 96, 180 (2017).
17. Amon T. a 13 spoluautorů: *EU AGRO BIOGAS PROJECT, 2009. XXXIII CIOSTA – CIGR V Conference*, Reggio Calabria – Italy, "Technology and management to ensure sustainable agriculture, agro-systems, forestry and safety", <https://edepot.wur.nl/169548>.
18. EPA: *Climate leaders greenhouse gas inventory protocol offset project methodology for project type: managing manure with biogas recovery systems (Version 1.3)*, Clim. Prot. Partnerships Division/Climate Change Division, Office of Atmospheric Programs, U.S. Environmental Protection Agency, USA (2008).
19. Fredenslund A. M., Hinge J., Holmgren M. A., Rasmussen S. G., Scheutz C.: 2018. *Bioresour. Technol.* 270, 88 (2018).
20. Liebetrau J., Reinelt T., Clemens J., Hafermann C., Friehe J., Weiland P.: *Water Sci. Technol.* 67, 1370 (2013).
21. Reinelt T., Delre A., Westerkamp T., Holmgren M. A., Liebetrau J., Scheutz C.: *Waste Manage.* 68, 173 (2017).
22. Flesch T. K., Desjardins R. L., Worth D.: *Biomass Bioenergy* 35(9), 3927 (2011).
23. Kvist T., Aryal N.: *Waste Manage.* 87, 295 (2019).
24. Martin J. H.: *Methane to markets: international guidance for quantifying and reporting the performance of anaerobic digestion systems for livestock manures*, Contract No. EP-W-07-067, EPA, USA 2008.
25. Groth A., Maurer C., Reiser M., Kranert M.: *Bioresour. Technol.* 178, 359 (2015).
26. Scheutz C., Fredenslund A. M.: *Waste Manage.* 97, 38 (2019).
27. IPCC: Databáze emisních faktorů EFDB. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>
28. National Inventory Report 2021 – Německo: <https://unfccc.int/documents/273433>
29. Cuhls C., Mähl B., Clemens J., Herrmann T.: *Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Německo (2015).
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-der-emissionssituation-bei-der>
30. National Inventory Report 2021 – Dánsko: <https://unfccc.int/documents/273129>
31. National Inventory Report 2021 – Švýcarsko: <https://unfccc.int/documents/271462>
32. National Inventory Report 2021 – Japonsko: <https://unfccc.int/documents/271503>
33. National Inventory Report 2021 – Lucembursko: <https://unfccc.int/documents/271572>
34. National Inventory Report 2021 – Rakousko: <https://unfccc.int/documents/273471>

A new approach in quantification of greenhouse gas emissions from anaerobic digestion in the Czech Republic

Ivana KOPECKÁ, Petr BAŽIL, Márton BORÁROS, Jiří VALTA, Miroslav HAVRÁNEK, Zdeněk SUCHÁNEK

Czech Environmental Information Agency, Moskevská 1523/63, 101 00 Prague, Czech Republic

Summary

The refinement and codification of the calculation of methane emissions produced during anaerobic digestion of waste is crucial for an adequate inventory of total emissions from the source category of biological waste treatment, which the Czech Republic has committed to fulfilling within the framework of the National Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Sinks. The new method takes into account top-down and bottom-up national waste data, nation-specific activity data and the current knowledge on emission factors based on recent foreign and domestic publications. The main sources of biogas leakage within the biogas plant were identified, including the design of a procedure to complement the measurement campaign. Based on the available information and data, the methane emission factor for the Czech Republic was refined to a value of 3.1 % and thus reduced compared to the original default value of 5 %. This step will help to refine and improve the work of the National Inventory System, which processes inventories in the waste sector and other areas of human activity.

Keywords: anaerobic digestion, emissions inventory, methane, waste, waste management, greenhouse gases