

TVEGANJA ZA POSAMEZNIKA IN OKOLJE PRI PROIZVODNJI BIOPLINA

RISKS TO THE INDIVIDUAL AND THE ENVIRONMENT IN BIOGAS PRODUCTION

Sabina Kolbl Repinc

doc. dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, Ljubljana, sabina.kolbl-repinc@fgg.uni-lj.si

Blaž Stres

prof. dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, Ljubljana, blaz.stres@fgg.uni-lj.si

Povzetek

V Sloveniji se število bioplinskih naprav zadnja leta ne spreminja. Drugod v Evropi se število bioplinskih enot povečuje, posledično se proizvodnja bioplina in biometana veča, povečuje pa se tudi verjetnost nesreč, kot so razlitje digestata, eksplozije plina in podobno. Zaradi visokih koncentracij dušika in fosforja je nenadzorovano razlitje digestata nevarno za okolje ter podtalnico. Slabo vzdrževanje opreme, tehnične napake merilnikov in nezadostno izobraževanje operaterjev bioplinskih naprav povečujejo tveganja za nastanek nesreč.

Abstract

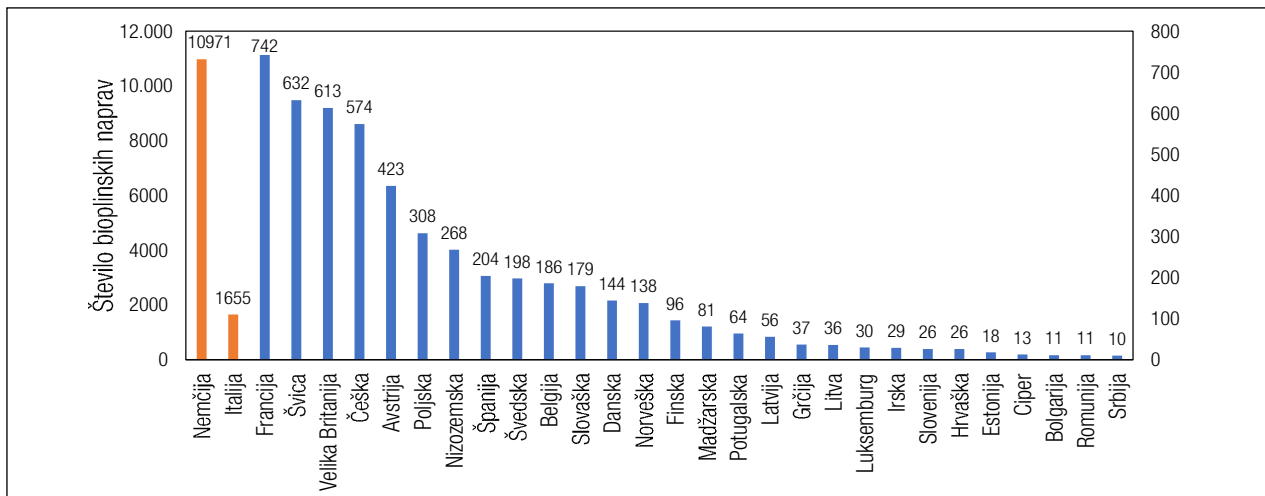
In the recent years, the number of biogas plants in Slovenia has remained unchanged. However, elsewhere in Europe, the number of biogas plants is increasing, and so is the production of biogas and biomethane, together with the likelihood of the occurrence of various accidents such as digestate spills, gas explosions and the like. Due to the high concentrations of nitrogen and phosphorus, an uncontrolled digestate spill poses a risk to the environment and to groundwater. Poor maintenance of technical equipment, technical errors in measuring devices, and inadequate training of biogas plant operators increase the likelihood of the occurrence of accidents.

Uvod

Proizvodnja bioplina s pomočjo bioplinskih enot v svetovnem merilu se povečuje. Trend rasti v Evropi se je zadnja leta nekoliko umiril in je približno dva odstotka (EBA, 2020). Povečalo se je število biometanskih naprav, saj jih je bilo skupno leta 2018 v Evropi 1610. Leta 2017 je inštalirana moč vseh bioplinskih naprav v Evropi znašala 10.532 MW, iz bioplina pa je bilo proizvedeno 65.179 GWh elektrike. Povečalo se je tudi število biometanskih elektrarn s 497 na 540. Največji delež bioplinskih in biometanskih naprav je v Nemčiji, sledijo ji Italija, Francija in Švica. V Sloveniji smo največje povečanje bioplinskih naprav zaznali v obdobju 2012–2016. Skupno število bioplinskih naprav po podatkih Evropskega združenja za bioplin (European Biogas Association – EBA) v Sloveniji je 26 za leto 2017 (slika 1). V Sloveniji je 17 bioplinarn, ki so v evidenci predelovalcev biološko razgradljivih odpadkov v digestat in imajo okoljevarstveno dovoljenje za predelavo odpadkov po podatkih ARSO (ARSO, 2019). Povprečna velikost bioplinske naprave v Veliki Britaniji je 2,68 MW_{el}, v Sloveniji pa 1 MW_{el}.

Bioplinske naprave kot organsko razgradljiv substrat uporabljajo različne surovine. Tako na primer komunalne čistilne naprave v anaerobnih gniliščih uporabljajo

odvečno blato iz aerobnega čiščenja. V čistilnih napravah, ki anaerobno tretirajo blato, prevladujejo predvsem klasična gnilišča. Pri bolj obremenjenih odpadnih vodah iz industrije so se uveljavili postopki s pritrjeno biomaso. Tam poznamo več vrst reaktorjev z moko anaerobno razgradnjo, kot so anaerobni reaktor z razpršeno biomaso in vertikalnim pretokom (upflow anaerobic sludge blanket reaktor – UASBR), anaerobni reaktor z granulami (expanded granular sludge bed reaktor – EGSB), anaerobni reaktor s polnilnim materialom (anaerobic packed-bed reaktor – AnPBR), anaerobni reaktor s pritrjeno biomaso (anaerobic expanded-bed reaktor – AnEBR) ter anaerobni reaktor s pritrjeno biomaso in vertikalnim pretokom (anaerobic fluidized reaktor – AnFBR), pri čemer vsebnost suhe snovi vhodnih substratov ne presega odstotka. Za anaerobno presnovo bioloških odpadkov se uporablja suha ali polsuha anaerobna razgradnja s komercialnimi sistemi, kot so Kompogas, BRV Design, Dranco Design in Valorga Design. Vsak sistem ima svoje posebnosti priprave substrata in konstrukcije reaktorjev, plinohranov, sistema priprave ter doziranja substratov. Bioplinske naprave so kompleksni inženirski sistemi, zato predstavljajo tveganja za nastanek nesreč z vidika zdravja in okolja. Kljub različnim substratom, ki jih bioplinske naprave uporabljajo za proizvodnjo bioplina in/ali metana, lahko osnovne korake v proizvodnji metana



Slika 1: Število bioplinskih naprav v Evropi leta 2017 (vir: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2019/11/EBA_report2018_abridged_A4_vers12_220519_RZweb.pdf)

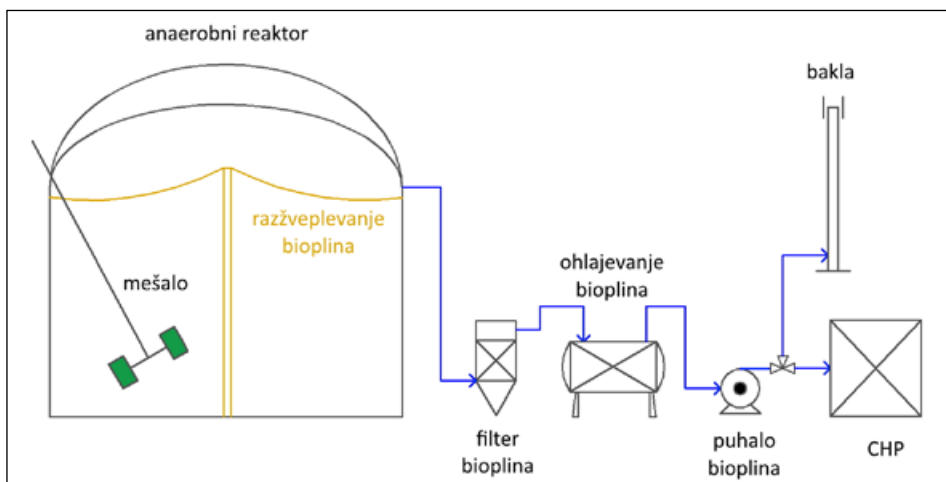
Figure 1: Number of biogas plants in Europe in 2017 (Source: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2019/11/EBA_report2018_abridged_A4_vers12_220519_RZweb.pdf)

naštejemo kot (Casson Moreno in drugi, 2018) anaerobno presnovo, odstranjevanje žvepovega sulfida in razvlaževanje. Glavna oprema bioplinskih naprav je anaerobni reaktor, v katerem pri anaerobnih pogojih in biokemijskih reakcijah nastaja bioplin. Ta se zbira v plinohramu anaerobnega reaktorja in po plinskih ceveh potuje do filtra, v katerem se ločijo vodne kapljice in morebitne pene, ki lahko nastanejo v anaerobnem reaktorju. Vlogo bioplina zmanjšamo v enoti za ohlajevanje bioplina. S pomočjo puhalo pripravljen bioplin doziramo v kogeneracijski (CHP) plinski motor (slika 2).

Proizvodnja bioplina v bioplinskih napravah je kompleksna in poteka s pomočjo anaerobne razgradnje, torej procesa, pri katerem organsko razgradljive substrate ob odsotnosti kisika in s pomočjo mikroorganizmov toliko razgradimo, da kot končni produkt dobimo metan. Proces poteka v bioplinskih reaktorjih v štirih fazah, in sicer hidrolizi, acidogenezi, acetogenezi ter metanogenezi. V prvi fazi hidrolitske bakterije razgradijo kompleksne organske snovi, in sicer ogljikove hidrate, proteine ter lipide, v monosaharide, aminokisljine, višje

maščobne kisline in alkohole. Za povečanje topnosti kompleksnih organskih snovi mikroorganizmi izločajo encime, ki pospešujejo kemične reakcije. Encimi se pritrjujejo na netopne substrate in jih pretvorijo v topno obliko. Substrati se tako s pomočjo mikroorganizmov razgradijo naprej v organske snovi s krajšimi molekulami. Med acidogenezo in acetogenezo mikroorganizmi razgradijo organske snovi na H_2 , CO_2 in acetat, med metanogenezo metanogene arheje iz acetata in vodika proizvedejo bioplin, in sicer metan, kot stranski produkt pa nastanejo tudi CO_2 in drugi plini v sledeh, kot sta NH_3 in H_2S .

Z večanjem števila naprav se je povečalo tudi število nesreč (Boscolo in drugi, 2020). Tako je bilo na primer več kot 200 analiziranih nesreč različnih avtorjev v zadnjih 21 letih. Število nesreč, ki so se zgodile v bioplinskem sektorju, in njihove posledice so v primerjavi z drugimi v bioenergijskem sektorju večji. Nesreče so v nekaterih primerih zahtevale tudi življenja, zato je analiza tveganj toliko bolj pomembna (Casson Moreno in drugi, 2018).



Slika 2: Poenostavljen procesni diagram bioplinske naprave (vir: povzeto po Casson Moreno in drugi, 2018)

Figure 2: A simplified flow diagram of a biogas plant (Source: Summarized from Casson Moreno et al., 2018)

Varnostna tveganja pri proizvodnji bioplina

Nevarnosti pri načrtovanju in ob delovanju bioplinskih ter biometanskih naprav lahko razdelimo na nevarnosti za okolje (emisije v zrak, emisije v vodo in zemljo) in nevarnosti za zdravje. Nevarnosti za zdravje lahko razdelimo v štiri kategorije, in sicer nevarne substance (na primer mešanice elementov v sledovih), nevarnost električnega udara, mehanske nevarnosti ter nevarnosti zaradi eksplozije in požara. Na sliki 3 so prikazane glavne nevarnosti na delih bioplinske in biometanske naprave (https://biogas-safety.com/Download/biogas_safety.pdf).

Nevarnosti za okolje

Do onesnaženja okolja lahko pride pri uhajanju oziroma izpustu bioplina v atmosfero in pri izpustu snovi, ki se uporablja v bioplinskih napravah (digestat, izcedne vode koruzne silaže, olja, goriva), v vodno okolje. Emisije iz bioplinskih naprav lahko razvrstimo v emisije v zrak ter emisije v zemljine in vodo (Bontempo in drugi, 2016).

Emisije v zrak, zemljo in vodna telesa

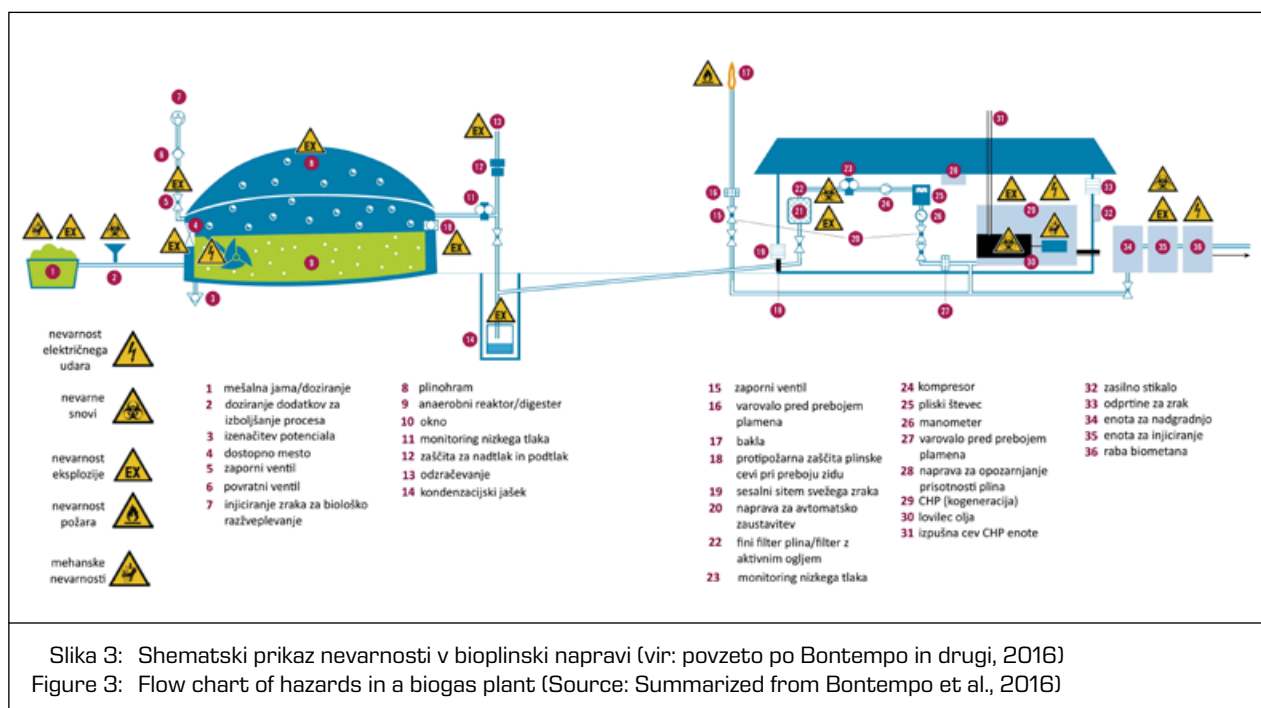
Med anaerobno presnovo pride do tvorbe metana, ogljikovega dioksida, vodikovega sulfida in amonijaka. Metan je razmeroma močen toplogredni plin. Pri proizvodnji bioplina v bioplinskih napravah se izognemo nenadzorovanim emisijam toplogrednih plinov, ki bi nastale pri odprtem hranjenju organskih snovi. Digestat iz bioplinske naprave se lahko uporabi kot organsko gnojilo in delno nadomesti uporabo umetnih gnojil. Tako delno pripomore k zmanjšanju emisij toplogrednih

plinov za proizvodnjo umetnih gnojil. Prav zaradi zmanjševanja emisij toplogrednih plinov je zelo pomembno, da v bioplinskih napravah ne pride do nezaželenih emisij metana oziroma da so te čim manjše (Bontempo in drugi, 2016).

Največ metana v bioplinskih napravah nastane v anaerobnih reaktorjih (digestorjih), nekaj pa tudi v končnih zalogovnikih. V plinskem ali kogeneracijskem motorju bioplinske naprave ob zgorevanju bioplina nastanejo plini, kot so dušikovi oksidi, žveplov dioksid, ogljikov monoksid in ogljikov dioksid, ter manjši trdni delci. Po študijah Deublein in Steinhauser (2008) delež CO₂ v izpustu v plinskih ali kogeneracijskih motorjih ne presega 16 odstotkov.

V nekaterih bioplinskih napravah se med proizvodnjo bioplina lahko poveča koncentracija amonijaka NH₃ v proizvedenem plinu in amonijevega iona (NH₄⁺), ki je raztopljen v digestatu, gnojivki in drugem. Obliki sta strupeni za žive organizme in rastline. Če NH₄⁺ zaide v podtalnico, nastaja nitrat, ki se v človeškem telesu reducira v nitrite. Pri dojenčkih se lahko pojavi metemoglobinemija, ko je prenos kisika po krvi onemogočen zaradi pretvorbe hemoglobina v disfunkcionalni hemoglobin (<https://www.babybook.si/methemoglobinemija/>). Na emisije amonijaka v zraku močno vpliva tehnika mokrega gnojenja. Priporočila so, da razpršitev poteka čim bližje tlom in da je razvoz na njivske površine opravljen ob bolj hladnih dneh in ne ob zelo visokih temperaturah (Bontempo in drugi, 2016).

Količina digestata, ki se shranjuje v končnih zalogovnikih v bioplinskih napravah, je lahko od sto do nekaj tisoč kubičnih metrov. Nesreče z razlitjem digestata iz anaerobnih reaktorjev in končnih zalogovnikov navadno





Slika 4: Nesreča izlitja digestata na bioplinski napravi (foto: S. Kolbl Repinc)
Figure 4: Digestate spill at a biogas plant (Photo: S. Kolbl Repinc)

potekajo nenadzorovano. Večji del digestata lahko zide v vodna telesa, kot so potoki, reke, jezera in drugo. Vpliv na vodna telesa je lahko različen, saj je odvisen od ekosistema vodnega telesa in sestave ter redčenja polutanta. Digestati z višjo koncentracijo vplivajo na to, da se koncentracija kisika v vodi zniža, kar povzroči pogin rib in drugih vodnih živali, ki za življenje potrebujejo kisik. Manjše koncentracije digestata v vodnih telesih lahko zaradi organske obremenitve s hranili povzročijo evtrofikacije in zmanjšajo kakovost vode v vodnem telesu (Studer in drugi, 2017). Nekaj primerov pogina rib zaradi onesnaženja vodotokov z digestatom ali gnojevko je bilo tudi v Sloveniji (slika 4).

Skupna količina vode v reki je kombinacija površinskega pretoka vode skupaj s precejšnjim obsegom, ki teče skozi podpovršinske kamnine in prod. To imenujemo hiporeična cona, z vodo nasičeno območje pod strugo in ob njej. Hiporeična cona je močno povezana s talno vodo. Pri številnih rekah v velikih dolinah lahko ta nevidna sestavina toka močno presega vidni tok (<https://sl.wikipedia.org/wiki/Reka>; Mugnai in drugi, 2015). Glede na količino in koncentracijo digestata lahko tako onesnaženje spremeni habitatne lastnosti hiporeične

cone in povzroči subletalne vplive znotraj vodne prehranske mreže, vendar točen vpliv na hiporeično cono z onesnaženja z digestatom ni dobro pojasnjen. V hiporeični coni so poleg fizikalnih in kemijskih parametrov pomembne tudi mikrobne združbe, ki imajo vlogo biološkega indikatorja delovanja in prilagajanja temeljnemu pogojem (Studer in drugi, 2017).

Nevarnosti za zdravje

Nevarne snovi

Nekatere snovi zaradi svojih lastnosti, kot so na primer strupenost, jedkost, vnetljivost, eksplozivnost, rakotvornost in drugo, predstavljajo večje tveganje za zdravje ter okolje. Take snovi imenujemo nevarne snovi, ki so v skladu z zakonodajo razvrščene in označene s piktogrami oziroma simboli za nevarne snovi. Tveganje pomeni verjetnost, da pride pri uporabi in/ali izpostavljenosti delavca kemični snovi do škodljivega delovanja na človeški organizem (Uradni list RS, št. 100/01 in 78/19). Nevarne substance so lahko v trdni ali tekoči obliki, v obliki aerosolov oziroma plinov. Na bioplinski oziroma biometanski napravi delavci lahko pridejo v stik z dodatki za izboljšavo bioplina (na primer dodajanje encimov, mikroelementov), olji, kemikalijami, aktivnim ogljem, izcednimi vodami silaže, gnojem in gnojevko, odpadki in mikroorganizmi (Bontempo in drugi, 2016). Izpostavljenost ali stik s takimi snovmi lahko privede do nevarnosti zadušitve in zastrupitve. Med stranskimi produkti je nevaren tudi H_2S , katerega koncentracija v bioplenu je med 50 in 20.000 ppm. Že kratka izpostavljenost koncentraciji 10 ppm je zelo toksična (preglednica 1). Povečane koncentracije povzročajo tudi korozijo napeljav in plinskih motorjev (Casson Moreno in drugi, 2018), kar vpliva tudi na garancijske pogoje strojne opreme in plinskih motorjev. Večje koncentracije H_2S nastanejo v bioplenu, ki je proizveden iz bioloških odpadkov in gnojevke (preglednica 2).

Vrsta plina	Lastnosti	Nevarne koncentracije v atmosferi	Mejne vrednosti za izpostavljenost na delovnem mestu
CO_2	Plin brez barve in vonja, težji od zraka	8 odstotkov v/v, nevarnost zadušitve	5500 ppm
NH_3	Plin brez barve rezkega vonja, lažji od zraka	Koncentracija, večja 30–40 ppm, draži sluznico, oči in dihala. Pri koncentraciji, večji od 1000 ppm, je oteženo dihanje in pride do izgube zavesti. Območje eksplozije: 15–28 %	20 ppm
CH_4	Plin brez barve in vonja, lažji od zraka	Območje eksplozije: 4,4–16,5 %	—
H_2S	Močno toksičen brezbarvni plin, težji od zraka. Vonj ima po gnilih jajcih.	Pri koncentraciji, večji od 200 ppm, čutila vonja odpovedo in plinov ne vohamo več. Pri koncentraciji, večji od 700 ppm, je vdihavanje plina smrtonosno in pride do dihalnega zastoja. Območje eksplozije: 4,3–45,5 %	5 ppm

Preglednica 1: Lastnosti plinov v bioplenu (vir: <https://biogas-safety.com>, <http://www.gtg-plin.com/>)

Table 1: Properties of the gases in biogas (Source: <https://biogas-safety.com>, <http://www.gtg-plin.com/>)

Substrat	Koncentracija (ppm)
Blato iz čistilnih naprav	10–75
Praščija gnojevka	1200–2400
Gnojevka	200–1200
Biološki odpadki	500–6000

Preglednica 2: Vsebnost H_2S v surovem bioplenu pri doziranju različnih substratov (vir: Trávníček in Kotek, 2015)

Table 2: H_2S content in crude biogas when dosing different substrates (Source: Trávníček and Kotek, 2015)

Vodikov sulfid zmanjša življenjsko dobo cevi in vseh napeljav za uporabo bioplina, saj je toksičen ter zelo koroziven za več vrst jekla. Da bi preprečili škodo na kogeneracijskem motorju in drugi opremi, moramo vodikov sulfid odstraniti iz bioplina ali njegovo koncentracijo zmanjšati. Za normalno delovanje kogeneracijskega motorja so mejne vrednosti vodikovega sulfida med 100 in 500 mg/ Nm^3 H_2S , kar je enako 0,05 odstotka volumna, odvisno od priporočil proizvajalca CHP, ne smemo pa jih preseči. Za odstranjevanje vodikovega sulfida lahko uporabimo različne kemične, fizikalne in biološke postopke, cilj čiščenja pa je, da dosežemo koncentracijo 20 mg/ Nm^3 H_2S v bioplenu. Najboljše rezultate dosežemo s kombinacijo teh postopkov (Deublein in Steinhauser, 2008).

Pri biološkem odstranjevanju vodikovega sulfida aerobni mikroorganizmi, ki odstranjujejo vodikov sulfid, potrebujejo za preživetje kisik. Zadostna hitrost dodajanja zraka je od štiri do šest odstotkov bioplina. Zaradi nevarnosti eksplozije mora biti doziranje zraka omejeno.

Najvišja koncentracija zraka je 12 odstotkov bioplina. Mikroorganizmi prav tako potrebujejo zadostno površino oziroma navlaženo površino s substrati za nastanitev. Za razžveplanje 20 m^3 bioplina na dan pri temperaturi 20 °C je potrebna površina m^2 (Deublein in Steinhauser, 2008).

Biološki dejavniki

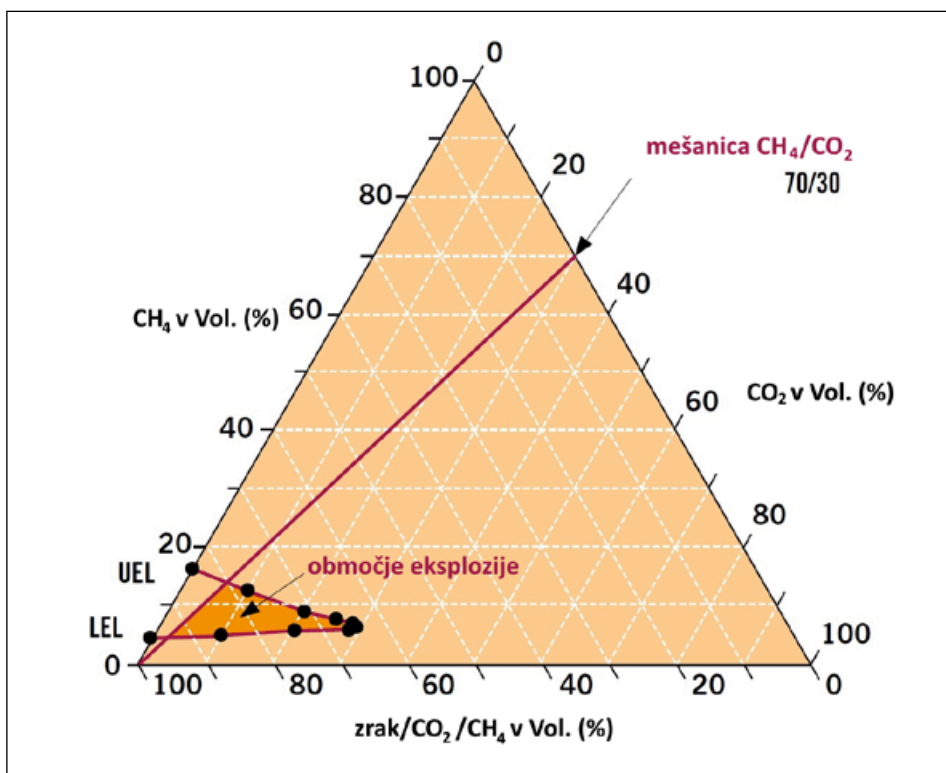
Biološki dejavnik pomeni mikroorganizme, vključno z gensko spremenjenimi organizmi, celične kulture in človeške endoparazite, ki lahko povzročijo okužbo, alergijo ali zastrupitev ter ogrožajo zdravje (Uradni list RS, št. 4/02, 39/05 in 43/11 – ZVZD-1).

Na bioplinski in biometanski napravi lahko pridemo v stik z mikroorganizmi ob vdihavanju prašnih aerosolov, na katerih so lahko plesni, bakterije ali endotoksini (na primer iz koruzne silaže ali suhega perutninskega gnoja). Prav tako so nevarne snovi v digestatu in vhodnih substrati (na primer biološko blato, biološki odpadki, gnojevka ali gnoj) (Bontempo in drugi, 2016).

Nevarnosti zaradi električne opreme in mehanske poškodbe

Bioplinske in biometanske naprave za delovanje potrebujejo strojno opremo, kot so mešala in črpalke. Te naprave delujejo pod visoko napetostjo, zato pri nepravilnem delovanju ali okvari enot oziroma poškodbi električnih kablov lahko pride do električnega udara.

Mehanske poškodbe, ki se lahko pripetijo na bioplinskih in biometanskih napravah, so padci (v jašek, mešalno



Slika 5: Meje eksplozivnosti metana (vir: povzeto po Bontempo in drugi, 2016)

Figure 5: Methane explosivity limits (Source: Summarized from Bontempo et al., 2016)

jamo) ali poškodbe s premikajočimi se deli naprave (mešala, mlini, rezalniki). Do takih nesreč po navadi pride med vzdrževalnimi deli in popravili.

Nevarnost eksplozije in požara

Bioplin je zelo gorljiv plin, zato moramo z njim ravnati skladno z varnostnimi predpisi, torej se izogibati vročini in vročim površinam, iskram, odprtemu ognju ter drugim virom vžiga. Tveganje za nastanek eksplozivne mešanice zraka in metana je od pet do 15 odstotkov (slika 5).

Zaradi nevarnosti eksplozije mora biti anaerobni reaktor pod pozitivnim tlakom, če nenamerno pride do stika z okoliškim zrakom. Pri normalnih pogojih torej majhen pozitivni tlak preprečuje penetracijo zraka v bioreaktor. Anaerobni reaktorji so opremljeni z ločenimi regulatorji za pod- in nadtlak. Tako je na primer v bioplinski elektrarni v Vučji vasi največji obratovalni tlak 8 mbar. Če pride do izpada motorja ali imamo preveliko proizvodnjo plina, je nameščena bakla za kurjenje plina, s čimer preprečimo, da bi nezgoreli bioplin uhajal v atmosfero. Bakla se lahko vklopi ali izklopiti z zunanjim ukazom oziroma jo je mogoče pognati samodejno, na primer ob izpadu električnega agregata ali povečanju tlaka plina na več kot 8 mbar. Podzemna plinska napeljava mora biti položena z najmanj dwoodstotnim naklonom proti jaški za izločanje kondenzata.

Proizvodnja bioplina med anaerobno digestijo poteka nestalno, zato je treba pri uporabi bioplina za delovanje bioplinske naprave plin shraniti za takrat, ko je povpraševanje večje od proizvodnje plina. Za to potrebujemo plinohram z dovolj veliko zmogljivostjo. Ločimo dve vrsti plinohramov za uporabo, in sicer gravitacijske plinohrame in plinohrame pod tlakom. Nizkotlačni in plavajoči pokrovi digestorjev spadajo med gravitacijske plinohrame. Plinohrami pod tlakom s povprečnim tlakom od 140 do 350 kN/m² so sferične oblike (Deublein, Steinhäuser, 2008).

Nesreče na bioplinskih in biometanskih napravah

Sistematičnega pristopa k prepoznavanju tveganj in nevarnosti pri proizvodnji bioplina so se lotili Casson Moreno in drugi (2018). Uporabili so metodologijo dinamičnega postopka za ugotavljanje nevarnosti (Dynamic Procedure for Hazard Identification – DyPASI). Ta metoda sistematizira sistem informacij zgodnjih indicov o tveganjih pri nesrečah, do katerih je že prišlo, in študije tveganj, poleg tega podpira identifikacijo in oceno netipičnih mogočih scenarijev nesreč glede na snovi, opremo in lokacijo industrijskega objekta (Paltrinieri in drugi, 2013).

Prepoznali so kritične dogodke, njihove vzroke in posledice. V preglednici 3 so predstavljeni vzroki nekaterih večjih nesreč in nesreč, ki so se pripetile zadnja leta.

Trávníček in drugi (2019) ter Casson Moreno in drugi (2016) so pripravili seznam najpogostejših nesreč, ki so se zgodile na bioplinskih napravah. Glede na vzroke so jih razdelili na:

- nesreče zaradi naravnih dogodkov, do katerih je prišlo predvsem zaradi:
 - intenzivnih padavin,
 - poplav (sila vzgona),
 - zamrznitve ventila,
 - velike količine snega (teža snega),
 - udara strele,
- nesreče zaradi napak operaterjev, do katerih je prišlo predvsem zaradi:
 - nenamernega predoziranja reaktorja oziroma zalogovnika,
 - napake pri vgradnji tesnila,
 - odprtega ročnega ventila,
 - napačne interpretacije informacij (na primer demontaže ventila na napačnem zalogovniku),
 - tvorbe H₂S med doziranjem substratov,
- zlonamerni posegi zaradi:
 - sabotaže,
 - kraje črpalke in druge opreme,
- nesreče zaradi napake pri načrtovanju:
 - nepravilnega dimenzioniranja anaerobnega reaktorja,
 - nepravilnega dimenzioniranja mešala,
- nesreče zaradi okvare opreme:
 - napake programske opreme,
 - napake na ventilu,
 - okvare črpalke,
 - napake v materialu in okvare tesnjenja,
 - okvare separatorja,
- nesreče zaradi malomarnega nadzora:
 - obratovanja z zarjavelimi ventili,
 - razpadanja rezervoarja in razpok v rezervoarju,
 - puščanja cevi in okvare cevi,
- nesreče med vzdrževanjem in popravili:
 - nepravilno varjenje in rezanje,
 - korozija materiala,
- nesreče zaradi nepravilnih organizacijskih postopkov:
 - nepravilen postopek čiščenja rezervoarja,
 - nepravilno spiranje sodov z ostanki pesticidov,
- drugega:
 - požar,
 - eksplozija.

Iz analize podatkov različnih baz nesreč so raziskovalci ugotovili (Casson Moreno in drugi, 2016; Hedlund in Madsen, 2018):

- do izpusta bioplina pride predvsem zaradi:
 - okvare opreme,
 - okvare komponent,
 - operativnih napak,

Leto	Lokacija	Kratek opis	Vir
1997	Italija	Med proizvodnjo bioplina na čistilni napravi eksplozija pri popravljanih delih na gnilišču: kombinacija puščanja plina in varjenja je povzročila eksplozijo. Umrli sta dva delavca, več jih je bilo ranjenih. Gnilišče je bilo močno poškodovano, saj je odneslo pokrov gnilišča.	Casson Moreno in drugi, 2016
1998	Italija	Eksplozija bioplina na enoti za predpripravo bioplina med popravilom sesalne naprave: en človek je umrl, dva sta bila poškodovana.	Casson Moreno in drugi, 2016
2016	Francija	Izpust bioplina na čistilni napravi zaradi zamrznjenih cevi pri $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$: tok plina do analizatorjev je bil prekinjen, zato je bil varnostni mehanizem za javljanje kisika v ceveh nefunkcionalen.	Baza podatkov Analiza, raziskave in informacije o nesrečah (Analysis, Research and Information on Accidents – ARIA)
2016	Francija	Izpust bioplina iz čistilne naprave zaradi okvare ventila: v ozračje je bilo izpuščene 2,3 tone bioplina.	Baza podatkov ARIA
2012	Francija	Iztok digestata iz jeklenega anaerobnega reaktorja v kanalizacijo zaradi korozije: ta je nastala zaradi prisotnih bakterij, ki reducirajo sulfat, zato je nastal H_2S , ki je zelo koroziven.	Baza podatkov ARIA
2005	Francija	Emisije H_2S v centru za ravnanje z odpadki: med proizvodnjo bioplina iz organskih odpadkov so zaradi sproščanja H_2S umrli štiri ljudje, in sicer trije zaposleni ter voznik tovornjaka.	Baza podatkov ARIA
2014	Francija	Izliv digestata iz biometanske naprave v okolje: digestat je prekril cesto in stekel v kanalizacijski sistem. Penjenje v končnem zalogovniku je onemogočilo varnostna opozorila za iztok digestata.	Baza podatkov ARIA
2016	Francija	Poplava na biometanski napravi zaradi naliva: voda je bila visoka pol metra.	Baza podatkov ARIA
2013	Francija	Zamašitev iztočne cevi anaerobnega reaktorja: do zamašitve je prišlo med hidrostatičnim testom naprave, ker so pred obratovanjem pozabili odstraniti čep.	Baza podatkov ARIA
2013	Francija	Izpuščanje bioplina na čistilni napravi zaradi korozije plinske cevi: zaradi povečane koncentracije H_2S v bioplenu, saj je blato vsebovalo manj železovega klorida, ki nevtralizira H_2S , in starejše plinske napeljave je nastala štiri centimetrov velika luknja na podzemni plinski napeljavi, ki je povezovala digestorja in plinohram. V zrak je ušlo 24.000 m^3 bioplina.	Baza podatkov E-sistem poročanja o večjih nesrečah (The Major Accident reporting System – eMARS) in ARIA
2010	Francija	Izpust bioplina iz čistilne naprave: do izpusta je prišlo zaradi požara varovalke na stikalni plošči, tako da varnostni sistemi niso delovali zaradi prekinitve z elektriko.	eMARS in ARIA
2019	Nemčija	Požar in izpust metana iz anaerobnega digestorja: med rednimi vzdrževalnimi deli je bil zamenjan kabel na mešalu anaerobnega reaktorja. Najverjetneje se je kabel med delovanjem ovil okrog propelerja. Poškodoval se je plinohram na digestorju in iztekati je začel bioplin, ki se je vnel.	Baza podatkov Centralni center za poročanje in ocenjevanje incidentov in napak v sistemih procesnega inženiringa (Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen – ZEMA)
2019	Nemčija	Puščanje bioplina zaradi sunka močnega vetra: po neurju je zaradi razpoke v membrani plinohrama končnega zalogovnika prišlo do uhajanja bioplina.	Baza podatkov ZEMA
2019	Nemčija	Požar na bioplinski napravi: vzrok požara na strehi enote za sušenje je bil razvrščen kot nerazrešljiv. Najverjetneje je prišlo do vžiga prašnih usedlin, ki so prišle v stik z izpušno cevjo.	Baza podatkov ZEMA
2019	Nemčija	Izpust H_2S iz bioplinske naprave: ena smrtna žrtev. Med polnjenjem tekočega substrata je zaradi kemične reakcije prišlo do sproščanja visokih koncentracij H_2S , zato je bila vrednost več kot 2000 ppm.	Baza podatkov ZEMA
2019	Nemčija	Puščanje plina 98,2 % CO_2 in 1,8 % metana na biometanski napravi zaradi nevihte Eberhard: dvojna membrana dveh anaerobnih zabojujnikov je bila poškodovana.	Baza podatkov ZEMA
2019	Nemčija	Med obratovanjem bioplinske naprave je del naprave za anaerobno presnovo 1, ki je sestavljena iz bazena za trdne snovi, mešalne jame, fermentorja 1 in končnega zalogovnika digestata 1, preplaval digestat iz končnega zalogovnika. Digestat je napolnil plinske cevi linije 1 in kondenzacijski jašek.	Baza podatkov ZEMA
2019	Nemčija	Puščanje bioplina na končnem zalogovniku zaradi neurja in vetra: zaradi močnega vetra in velike količine mokrega snega na »strehi« in robu »strehe« končnega zalogovnika se je strgala membrana plinohrana na končnem zalogovniku. Zrušile so se tudi stranske opore membran, kar je porušilo oporo osrednjega lesenega temelja.	Baza podatkov ZEMA
2019	Nemčija	Udar strele v bioplinsko napravo: strela je povzročila požar v prostoru za shranjevanje plina. Dobava plina je bila prekinjena.	Baza podatkov ZEMA
2018	Nemčija	Izpusti bioplina zaradi sunkov vetra ob nevihti: zaradi bližajoče se nevihte so povečali tlak v plinohramih, da bi povečali stabilnost plinohrama. Zaradi nevihte sta se strgala zaščitna streha, verjetno po sivih folije, in plinohram.	Baza podatkov ZEMA

Leto	Lokacija	Kratek opis	Vir
2014	Slovenija	Razlitje gnojnice zaradi popustitve vrat na rezervoarju z gnojevko: poginile so ribe.	http://www.primorske.si/novice/kronika/iz-bioplinarne-usla-vecja-kolicina-gnojnice
2019	Slovenija	Izlitje kislega digestata v melioracijski jarek	https://vestnik.si/clanek/aktualno/bioplinarska-logarovci-izpust-kislega-digestata-v-jarek-722931
2016	Slovenija	Zaradi iztekanja gošče iz bioplinarne v potok so poginile ribe.	https://www.tednik.si/tednik/2019-ormoz-za-pogin-rib-krivo-iztekanje-gosce-iz-bioplinarne
2011	Slovenija	Izlitje gnojnice iz bioplinarne	https://www.rtvlo.si/okolje/novice/pogin-rib-po-izlitju-gnojnice-iz-bioplinarne/262117
2018	Velika Britanija	Izliv blata na čistilni napravi zaradi korozije jeklenega zalogovnika blata	United Kingdom Environment agency (2018)
2018	Velika Britanija	Iztok izcednih vod koruzne silaže: do tega je prišlo na več točkah, in sicer horizontalnih silosih oziroma boksih, stranski drenaži ter laguni. Izteklo je približno 500 m ³ izcedne vode.	United Kingdom Environment agency (2018)
2018	Velika Britanija	Požar na biometanski napravi: do tega je prišlo na enoti CIF (catalytic iron filter). Najverjetnejši vzrok požara je bila tvorba pirofilnega železovega silfida.	United Kingdom Environment agency (2018)
2016 in 2017	Velika Britanija	Iztok izcednih vod silirane koruze: iz siliranih kupov koruzne silaže je pozimi v bližnji potok odtekala izcedna voda.	United Kingdom Environment agency (2018)
2018	Velika Britanija	Požar na bioplinski napravi: zaradi udara strele v končni zalogovnik je prišlo do požara. Zgorela je membrana končnega zalogovnika.	United Kingdom Environment agency (2018)

Preglednica 3: Primeri nesreč na bioplinskih in biometanskih napravah
Table 3: Examples of accidents at biogas and biomethane plants

- do eksplozije je prišlo zlasti zaradi:
 - nepravilnega vzdrževanja,
 - napak pri projektiranju,
- vzroki, do katerih je prišlo do požara, v večini primerov niso znani ali raziskani.

Nekateri varnostni vidiki pri načrtovanju bioplina in ravnanju z biološko razgradljivimi substrati ter digestatom so v Uredbi o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata (Uradni list RS, št. 99/13, 56/15 in 56/18). Po tej uredbi je pri načrtovanju bioplinarne treba zagotoviti, da je zunanji rob območja bioplinarne od območij stanovanjskih, gostinskih, upravnih, pisarniških in trgovinskih stavb, sejemskih dvoran in razstavišč, stavb za kulturo in razvedrilo, muzejev in knjižnic, stavb za izobraževanje in znanstvenoraziskovalno delo, stavb za zdravstvo in šport ter športnorekreacijskih površin oddaljen:

- najmanj 300 metrov,
- najmanj 500 metrov pri anaerobni razgradnji z naknadnim odprtim kompostiranjem.

Pri načrtovanju, gradnji in vzdrževanju bioplinarne mora investitor ali predelovalec biološko razgradljivih odpadkov zagotoviti, da se za odpadne vode, ki nastajajo v bioplinski, in za izcedne vode iz skladiščenih pošiljk odpadkov zagotovita zajem in vračanje v ponovno uporabo pri predelavi biološko razgradljivih odpadkov ali odvajanje v skladu s predpisi, ki urejajo emisije snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo.

Pri načrtovanju, gradnji in vzdrževanju bioplinarne z zmogljivostjo, enako ali večjo od deset ton na dan, mora predelovalec biološko razgradljivih odpadkov pri skladiščenju biološko razgradljivih odpadkov, razen pri skladiščenju izključno gnojevke ali energetskih rastlin, zagotoviti tudi:

- zaprte zalogovnike s samodejnim zapiranjem,
- odsesavanje in odvajanje plinov iz zalogovnika čez enoto za čiščenje odpadnih plinov.

Sklepne misli

Proizvodnja biometana in bioplina pomeni nezanemarljivo tveganje za zdravje ter varnost zaposlenih in okolja. Pri načrtovanju, gradnji in med obratovanjem bioplinske in biometanske naprave je treba glede na izkušnje ter nesrečne dogodke, ki so se zgodili, dopolnjevati in izboljševati varnostne standarde. Prav tako je treba bolj ozaveščati lastnike naprav o tveganjih. Nujna so izobraževanja operaterjev bioplinskih naprav, predvsem v kmetijskih bioplinah, saj imajo izvajalci redko posebno usposabljanje za varno delo na bioplinski napravi. Vodenje procesa anaerobne presnove brez predznanja osnovnih biokemičnih procesov pri proizvodnji metana lahko povzroči tvorbo višjih koncentracij nezaželenih stranskih produktov, kot sta NH₃ in H₂S. Z določenim znanjem lahko take scenarije z ustreznimi ukrepi preprečimo ali zmanjšamo. Izobraževanje je nujno tudi zaradi zmanjševanja človeških napak. Za nemoteno delovanje so nujna redna vzdrževalna dela in redno

pregledovanje, saj se je veliko nesreč dogodilo zaradi tehnične okvare nekaterih sklopov bioplinske naprave (Trávníček in drugi, 2018). Zaradi visokih stroškov popravil in vzdrževanja se pregledi ter popravila ne izvajajo redno, temveč le v nujnih primerih, ko je ogroženo delovanje bioplinske naprave in s tem dohodki.

Kljub vsemu opisanemu v članku bioplinske naprave ne predstavljajo tako velikega tveganja kot industrijske naprave, ki uporabljajo veliko različnih kemikalij, vendar se tudi ob manjšem tveganju lahko zgodijo nesreče s smrtnim izidom.

Viri in literatura

1. ARIA. <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/?lang=en>.
2. ARSO, 2019. <http://www.arso.si/varstvo%20okolja/odpadki/podatki/>.
3. Bontempo, G., Maciejczyk, M., Wagner, L., Findeisen, C., Mareike Fischer, F. H., 2016. BIOGAS Safety first! Guidelines for the safe use of biogas technology. 68 str. [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-biogas-safety_eng/\\$file/Safety_Guidelines_english.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-biogas-safety_eng/$file/Safety_Guidelines_english.pdf).
4. Boscolo, M., Bregant, L., Miani, S., Padoano, E., and Piller, M., 2020. An enquiry into the causes of an explosion accident occurred in a biogas plant. *Process Safety Progress*, 39(1), e12063. [online] <https://doi.org/10.1002/prs.12063>.
5. Casson Moreno, V., Guglielmi, D., and Cozzani, V., 2018. Identification of critical safety barriers in biogas facilities. *Reliability Engineering & System Safety*, 169, 81–94. doi:10.1016/J.RESS.2017.07.013.
6. Casson Moreno, V., Papasidero, S., Scarponi, G. E., Guglielmi, D., and Cozzani, V., 2016. Analysis of accidents in biogas production and upgrading. *Renewable Energy*, 96, 1127–1134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.017>.
7. Deublein, Steinhauser, 2008. *Biogas from waste and renewable resources. An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim. 443 str.
8. EBA. https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2019/11/EBA_report2018_abridged_A4_vers12_220519_RZweb.pdf.
9. eMARS: The Major Accident Reporting System. <https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content>.
10. Hedlund, F. H., Madsen, M., 2018. Incomplete understanding of biogas chemical hazards – Serious gas poisoning accident while unloading food waste at biogas plant. *Journal of Chemical Health & Safety*, 25(6), 13–21. doi:10.1021/acs.chas.8b25607.
11. <http://www.gtg-plin.com/>.
12. <http://www.primorske.si/novice/kronika/iz-bioplinarne-usla-vecja-kolicina-gnojnice>.
13. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Reka>.
14. <https://vestnik.si/clanek/aktualno/bioplina-logarovci-izpust-kislega-digestata-v-jarek-722931>.
15. <https://www.babybook.si/methemoglobinemija/>.
16. <https://www.rtvsl.si/okolje/novice/pogin-rib-po-izlitju-gnojnice-iz-bioplinarne/262117>.
17. <https://www.tednik.si/tednik/2919-ormoz-za-pogin-rib-krivo-iztekanje-gosce-iz-bioplinarne>.
18. Mugnai, R., Messina, G., Lorenzo, D., 2015. The hyperheic zone and its functions: revision and research status in Neotropical regions. *Braz. J. Biol.*, 75(3), 524–534. [online] <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.15413>.
19. Paltrinieri, N., Tugnoli, A., Buston, J., Wardman, M., Cozzani, V., 2013. Dynamic Procedure for Atypical Scenarios Identification (DyPASI): A new systematic HAZID tool. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 26, 683–695. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.01.006>.
20. Pravilnik o spremembah Pravilnika o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti kemičnim snovem pri delu, Uradni list RS, št. 78/19.
21. Pravilnik o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti biološkim dejavnikom pri delu, Uradni list RS, št. 4/02, 39/05 in 43/11 – ZVZD-1.
22. Pravilnik o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti kemičnim snovem pri delu, Uradni list RS, št. 100/01.
23. Studer, I., Boeker, C., Geist, J., 2017. Physicochemical and microbiological indicators of surface water body contamination with different sources of digestate from biogas plants. *Ecological Indicators*, 77, 314–322. doi:10.1016/J.ECOLIND.2017.02.025.
24. Trávníček, P., Kotek, L., 2015. Risks associated with the production of biogas in Europe. *Process Safety Progress*, 34(2), 172–178. doi:10.1002/prs.11734.
25. Trávníček, P., Kotek, L., Junga, P., Koutný, T., Novotná, J., Vítěz, T., 2019. Prevention of accidents to storage tanks for liquid products used in agriculture. *Process Safety and Environmental Protection*, 128, 193–202. doi:10.1016/J.PSEP.2019.05.035.
26. Trávníček, P., Kotek, L., Junga, P., Vítěz, T., Drápela, K., Chovanec, J., 2018. Quantitative analyses of biogas plant accidents in Europe. *Renewable Energy*, 122, 89–97. doi:10.1016/J.RENENE.2018.01.077.
27. United Kingdom Environment Agency, 2018. https://consult.environment-agency.gov.uk/environmental-permitting/standard-rules-consultation-no-20/user_uploads/incidents-report--2010-2018--final.pdf.
28. Uredba o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata, Uradni list RS, št. 99/13, 56/15 in 56/18.
29. ZEMA. <https://www.infosis.uba.de/index.php/en/site/13947/zema/index.html>.