

A karbidmész hasznosítási lehetőségei kommunális szennyvíztisztító telepeken

Nagy-Mezei Csenge^{1,2}, Gyarmati Imre¹, Bezsenyi Anikó^{1,3}, Kardos Levente²

¹ Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., Budapest

² Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék, Budapest

³ Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest

Kivonat

A karbidmész az acetilén egyik gyártási technológiája során nagy mennyiségben keletkező, erősen lúgos technológiai melléktermék, melynek gazdaságos és egyben környezetkímélő felhasználása a hulladékgazdálkodás egy aktuális témaköre. A karbidmész egy potenciális segédanyag lehet a szennyvíztisztításban, illetve a szennyvíztisztítás során képződő szennyvíziszap kezelésében, melynek adagolására több technológiai egységben is lehetőség nyílik a kommunális szennyvíztisztító telepeken, azonban adagolásának lehetséges pozitív, illetve negatív hatásai, a várható üzemeltetési állapotok nem teljes körűen tisztázottak. A karbidmész alkalmazhatóságának és hatékonyságának megismerése érdekében megvizsgáltuk a szennyvíz tápanyag-eltávolítását végző eleveniszap ülepedési tulajdonságaira és a foszfor kicsapatására gyakorolt hatásait, valamint laboratóriumi fermentációs reaktorrendszerben vizsgáltuk a tisztítóműben képződő, gravitációsan majd géppel elősűrített kevert szennyvíziszap anaerob lebontásának hatékonyságát, a folyamat stabilitását, illetve a képződő biogáz hozamát és összetételét, különböző koncentrációban történő karbidmész adagolás esetén. A mérések segítségével potenciális karbidmész adagolási pontokat és mennyiségeket állapítottunk meg, melyek alkalmazásával a szennyvíz tisztítása és a szennyvíziszap kezelése során tarthatók a megfelelő üzemeltetési körülmények. 4,00 mL-es 100x-os hígítású karbidmész dózis adagolásával jelentős orto-foszfát-foszfor koncentráció csökkenés érhető el. Az alkalmazott dózis 1 m³ szennyvízhez 47,2 g karbidmész (szárazanyag = 9,35 g) adagolásának felel meg, a méréshez használt szennyvíz minta kiindulási orto-PO₄³⁻-P-koncentrációja 0,47 mg/L volt, 4,00 mL 100x-os hígítású karbidmész adagolás után a szűrlet orto-PO₄³⁻-P-koncentrációja 0,17 mg/L volt, azonban az adagolt karbidmésznek az eleveniszap ülepedésére egyértelműen kedvező hatása nem volt. A laboratóriumi fermentációs reaktorrendszerben végzett vizsgálatok során megállapítottuk, hogy a karbidmész adagolt mennyiségének növelésével a képződő biogáz hozama csökkent, ezzel egyidejűleg a képződő biogáz metántartalma növekedett a kontroll reaktorokhoz képest. A folyamat stabilitása pH = 8,5-ig, 10,2 g karbidmész/nap adagolás esetén biztosított volt, ami 0,73 kg karbidmész/m³ hasznos térfogat dózissal felelt meg a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep esetében. Az üzemi rothasztók összes hasznos térfogatára vonatkoztatva ezzel ekvivalens karbidmész adagolás 9,2 tonna/nap.

Kulcsszavak: Ipari melléktermék, karbidmész, eleveniszap ülepedés, foszforeltávolítás, anaerob rothasztás, pufferkapacitás, biogáz hozam, lúgosság

1. BEVEZETÉS

A karbidmész az acetilén egyik gyártási technológiája során nagy mennyiségben keletkező, erősen lúgos technológiai melléktermék, melynek gazdaságos és egyben környezetkímélő felhasználása a hulladékgazdálkodás egyik aktuális témaköre. A Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. évek óta fogad karbidmeszet Észak-pesti Szennyvíztisztító Telepén, ahol korábban a szennyvíziszap kamrás préssel történő víztelenítéséhez adagolták vázképző anyagként. A szennyvíziszap szárazanyag-tartalmához viszonyítva mintegy 35-40% mész szárazanyag adagolására volt szükség, ami jelentős mértékben megnövelte a víztelenített szennyvíziszap mennyiségét, ez által az elhelyezési költségét is. A karbidmészrel történő stabilizálás a szennyvíziszap további mezőgazdasági hasznosítása szempontjából is kedvezőtlennek bizonyult.

A víztelenítési technológia az Észak-pesti Szennyvíztisztító Telepen az évek során módosult. A kamrás prések alkalmazását centrifugás víztelenítés váltotta fel, melyhez mész adagolására a továbbiakban nem volt szükség, a végtermék ez által kevesebb és hasznosításra,

komposztálásra is alkalmasabb lett. A karbidmész hasznosíthatóságának kérdése azonban továbbra is aktuális maradt. Felmerült annak lehetősége, hogy a karbidmész bizonyos hányada a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. másik tisztítótelepén, a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep technológiájába kerülne beadagolásra. Mindezek miatt fontossá vált alaposabban megvizsgálni, hogy mely technológiai folyamatokban és milyen módon célszerű hasznosítani a karbidmeszet, adagolásának milyen lehetséges pozitív, illetve negatív hatásai vannak.

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep fő tevékenysége a XX. kerületi Torontál utcai főgyűjtő csatornán érkező szennyvizek mechanikai és biológiai tisztítása. A kőfogó üledék és a rácsszemét eltávolítása után a homok és a zsír leválasztása történik a levegőztetett homok- és zsírfogó műtárgyban. A szerves anyagok és tápanyagok lebontása kétlépcsős biológiai eljárással (nagyterhelésű eleveniszapos, illetve bioszűrési eljárással) történik. A szennyvíz foszfor-tartalmának eltávolítása ülepitők előtt történő vas(III)-klorid adagolással történik. A teljes biológiai tisztítást követően a tisztított szennyvíz a Ráckevei-Soroksári Dunába távozik a telepről.

Az ülepitőkből leválasztott szennyvíziszap (nyers és fölös iszap), a mechanikai fokozatban eltávolított zsír, illetve a nagy szervesanyag-tartalmú beszállított hulladékok lebontása anaerob rothasztókban történik baktériumok segítségével. A folyamat során biogáz termelődik, amit gázmotorokban és gázkazánokban elégetve villamos- és hőenergia állítható elő. Az anaerob lebontás végterméke a rothasztott szennyvíziszap, ami centrifugákkal történő víztelenítést követően további célokra (pl. komposztálás) felhasználható.

Munkánk során vizsgáltuk a karbidmész adagolásának a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep nagyterhelésű eleveniszapos biológiai fokozatában a baktérium pelyhek ülepedési tulajdonságaira gyakorolt hatását, illetve az ezzel párhuzamosan elért foszfor kicsapatás mértékét. Vizsgáltuk továbbá laboratóriumi fermentációs reaktorrendszerben a tisztítóműben képződő, gravitációsan majd géppel elősűrített kevert szennyvíziszap anaerob lebontásának hatékonyságát, a folyamat stabilitását, illetve a képződő biogáz hozamát és összetételét, különböző koncentrációban történő karbidmész adagolás esetén.

2. A KARBIDMÉSZ ELEVENISZAP ÜLEPEDÉSI TULAJDONSÁGAIRA ÉS A FOSZFOR KICSAPATÁSÁRA GYAKOROLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

A karbidmész vízvonala történő adagolásának hatására a tisztítandó szennyvíz kémhatása jelentős ingadozást mutathat, pH-ja akár a 9,0 értéket is meghaladhatja, ami a biológiai szennyvíztisztítás szempontjából az ideális tartományon kívül esik. A szennyvíztisztítás során karbidmész adagolására ezért csak kis mennyiségben van lehetőség az optimális üzemeltetési állapotok megtartása mellett, azonban érdemes megvizsgálni a kis mennyiségben adagolt karbidmész eleveniszap ülepedési tulajdonságaira és a foszfor kicsapatására gyakorolt hatásait, melyek kiemelt fontosságú paraméterei a szennyvíztisztítási technológia megfelelő működésének és hatékonyságának.

Vizsgálatainkhoz a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep egyik nagyterhelésű eleveniszapos reaktorának eleveniszap szuszpenzióját használtuk.

A vizsgálatok elvégzéséhez használt karbidmész fontosabb jellemzői az alábbiak:

- Sűrűség: 1179,5 g/dm³
- Szárazanyag-tartalom: 198 g/kg
- pH: 12,5
- Lúgosság: 272 000 mg CaCO₃/L

A vizsgálatokat 7 db 1000 mL-es mérőhengerben végeztük. A homogenizált eleveniszap szuszpenzióval a mérőhengereket feltöltöttük, majd hozzáadtuk a karbidmész 100x hígítású szuszpenziójából a 1. táblázat szerinti mennyiségeket, majd a keveréket homogenizáltuk (a homogenizálást "kíméletesen" végeztük, figyelve arra, hogy az eleveniszap pehelyszerkezete a lehető legkisebb mértékben sérüljön). A homogenizálást követő 15 és 30 perc ülepedési idők elteltével leolvastuk az iszapfázis által elfoglalt térfogatot.

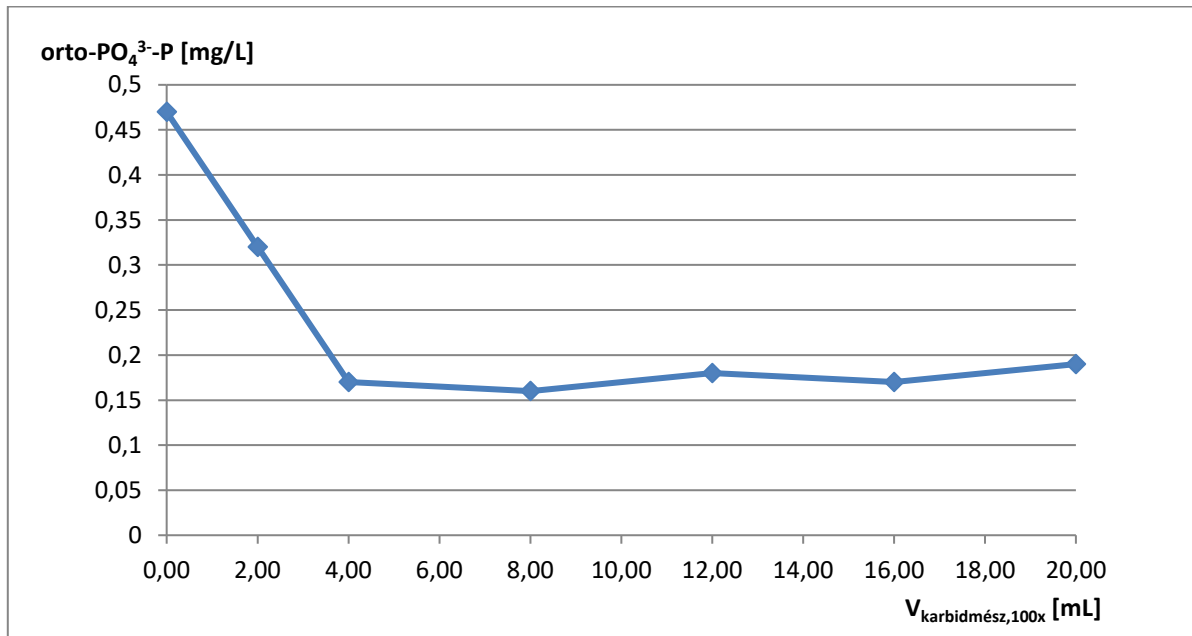
Adagolás 1000 mL eleveniszaphoz		Ülepedés		Szűrlet		Adagolás az eleveniszapos egységre	
$V_{\text{karbidmész,100x}}$ [mL]	$m_{\text{karbidmész}}$ [g]	$V_{\text{iszap, 15 perc}}$ [mL]	$V_{\text{iszap, 30 perc}}$ [mL]	pH	orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ [mg/L]	m_{karbid} [T / nap]	V_{karbid} [m ³ / nap]
0,00	0,0000	255	220	7,54	0,47	0,00	0,00
2,00	0,0236	255	220	7,67	0,32	1,11	0,94
4,00	0,0472	255	220	7,75	0,17	2,22	1,88
8,00	0,0944	240	210	7,87	0,16	4,44	3,76
12,00	0,1416	245	210	8,05	0,18	6,66	5,64
16,00	0,1888	240	210	8,29	0,17	8,87	7,52
20,00	0,2360	245	210	8,46	0,19	11,09	9,40

1. táblázat: Az iszaptérfogat (V_{iszap}), a pH és az orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ koncentráció alakulása, karbidmész adagolása esetén

A 30 perces ülepedési idő elteltével valamennyi mérőhenger ülepített tisztavíz fázisából mintát vettünk, amit MN715 típusú redős szűrőpapíron szűrtünk a maradék lebegőanyag-tartalom eltávolítása érdekében, valamint megmértük a tisztavíz fázis pH értékét is. A szűrletből a vizsgáló laboratórium orto-foszfát-foszfor (orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) meghatározást végzett (módszer: spektrofotometria, szabvány: MSZ EN ISO 6878:2004/4. fejezet). Az orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ koncentrációkat, valamint a mintákhoz tartozó pH értékeket az 1. táblázat tartalmazza. A vizsgálataink során a különböző karbidmész adagolásokhoz tartozó iszaptérfogat értékek között szignifikáns különbséget nem tapasztaltunk. Az elvégzett vizsgálatok alapján úgy tűnik, hogy az eleveniszap ülepedési képessége a karbidmész adagolás hatására kismértékben javult, 8 mL dózis és a feletti adagolás esetén a 30 perces iszaptérfogat csak mintegy 5%-kal csökkent. Ez alapján megállapíthatjuk, hogy a karbidmész adagolásoknak a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep nagyterhelésű eleveniszapjának ülepedési hatékonyságára kedvező hatása nincs jelentős mértékben.

A karbidmész adagolás hatása szignifikánsan az eleveniszap orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ koncentrációjában volt észlelhető. A szűrletminták orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ koncentrációja a karbidmész adagolás hatására csökkent, már viszonylag kis mennyiségű karbidmész adagolása is jelentős mértékű foszfor leválasztást eredményezett. Az orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ koncentrációjának csökkenése a 4,00 mL dózis értékig volt szignifikáns, ezt követően további karbidmész adagolással a szűrlet orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ koncentrációja tovább nem csökkent (1. ábra). A 4,00 mL-es karbidmész dózissal 64%-os orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ koncentráció csökkenés érhető el. A karbidmész adagolással párhuzamosan a pH emelkedése figyelhető meg. Mivel a karbidmész alkalmazása során szeretnénk elkerülni, hogy a vízfázisban lévő ammónium gáz állapotú ammóniává alakuljon, és a légtérbe távozzon, avagy mérgező hatást gyakoroljon a tisztítást végző mikroorganizmusokra, ezért az adagolható

menyiséget úgy kell megválasztani, hogy a pH ne haladja meg a 8,2-es értéket. Az eleveniszapos rendszer teljes tisztítókapacitására nézve ez naponta maximálisan 6,66 tonna (szárazanyag = 1,32 tonna) karbidmész adagolását jelentené a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep esetében, mellyel az eleveniszappal keveredett szennyvíz pH-ja 8,05-re emelkedne (1. táblázat).



1. ábra: Az orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ folyadékfázisbeli koncentrációjának változása a karbidmész adagolás hatására

3. A KARBIDMÉSZ ANAEROB FERMENTÁCIÓBAN TÖRTÉNŐ HASZNOSÍTHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen a különböző szerves anyagok, hulladékok anaerob biológiai bonthatóságának vizsgálatára, a várható biogáz hozam meghatározására laboratóriumi méretű fermentációs reaktorrendszer áll rendelkezésre.

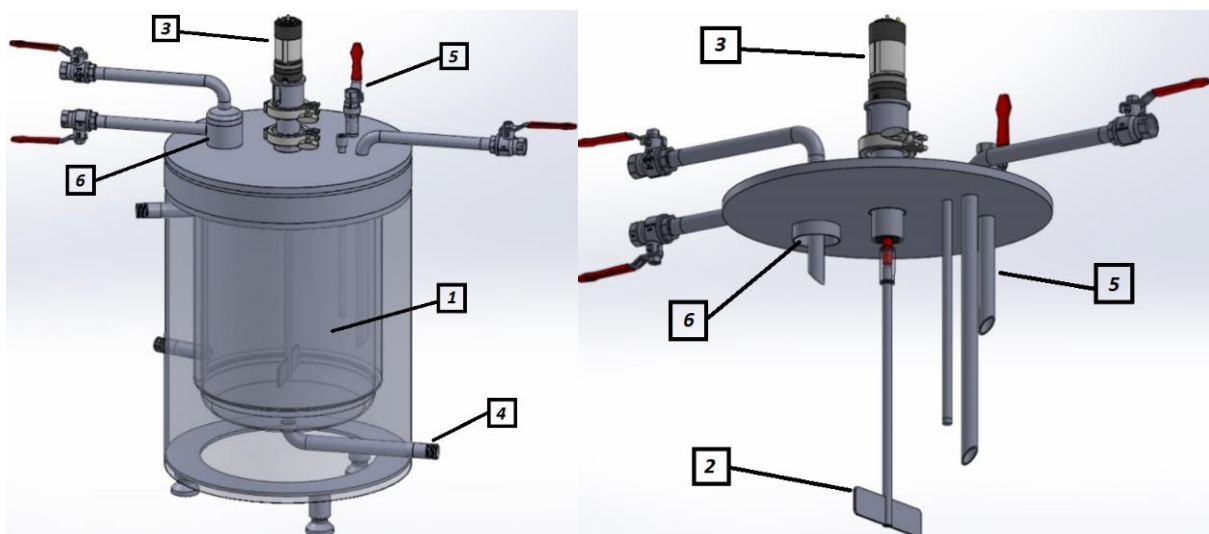
3.1. Laboratóriumi anaerob fermentációs reaktorrendszer és működése (Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., 2021)

A reaktorrendszer 6 db fermentor tartályból (1. fénykép és 2. ábra), 6 db gázgyűjtő tartályból, 6 db vízgyűjtő ballonból és 1 db automata szabályzású elektromos fűtőrendszerből áll.



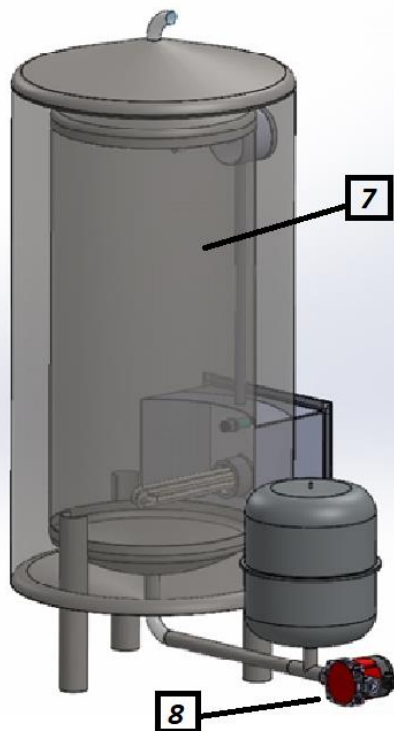
1. fénykép: Laboratóriumi fermentációs reaktorrendszer

A 14 liter hasznos térfogatú (össztérfogat 18 liter) duplafalú, palástfűtéses, rozsdamentes reaktorok (1) a fordulatszám szabályzást és idővezérlést lehetővé tevő automata szabályzású lapátos keverő rendszerrel (2) vannak ellátva. A hajtást hosszú élettartamú szénkefe nélküli aszinkron keverőmotorok (3) biztosítják. A reaktorfedél és a keverő tengely tömítése gázzáró. A folyadék tökéletes átkeverését, homogenizálását a reaktor belső falára merőlegesen beépített függőleges perdülettörő lemezek segítik. A reaktorfenék íves kialakítása miatt áramlástani holtterek kialakulására, üledék lerakódására nem kell számítani. A keverő hajtóművek túlmelegedésének és az alkatrészek túlzott kopásának elkerülése érdekében a keverők üzemelésének ciklusidejét egységesen 30 percre állítottuk, amit 30 perc üzemszünet követ (majd a ciklus újraindul). Tapasztalataink azt mutatják, hogy ezen beállítás esetén a kevert ciklusokban a homogenitás megfelelő. A fermentációs végterméket folyamatos keverés biztosítása mellett a reaktorok alján lévő csövön (4) keresztül lehet leengedni, a biogáz alapanyag betáplálása a reaktorfedélen kialakított csapon keresztül, a folyadékfelszín alá (5) történik.



2. ábra: Laboratóriumi fermentációs reaktor felépítése

A termelődött biogáz hozamát a hasonló reaktorrendszerek esetében gyakorta alkalmazott vízkiszorításos módszerrel (*Bakosné Diószegi et al., 2019*) mértük. A reaktorokban képződő és a gázdómon (6) keresztül távozó biogáz átvezetésre kerül a vízzel töltött alul-felül kúpos kialakítású 40 literes térfogatú rozsdamentes gáztartályokba, amelyekből a térfogatával arányos mennyiségű vizet kiszorítja. A kiszorított vizet 40 literes műanyag ballonokban gyűjtjük, mennyiségét súlyméréssel határozzuk meg. A képződő gáz normál térfogata (273 °K hőmérsékleten, 101 325 Pa nyomáson) a kiszorított víz tömegéből, a léghőmérsékletű laboratórium átlag hőmérsékletének, valamint a gázgyűjtő tartály aktuális folyadékszintje és a műanyag ballon bevezetési pontja közötti hidrosztatikai nyomás különbségének ismeretében számítható. A gázgyűjtő tartályban összegyűlt biogáz összetételét időszakosan Goliath Esders mobil biogáz analízátor csatlakoztatásával lehet mérni.



3. ábra: Elektromos fűtőbojler

A reaktorok hőmérsékletének közel állandó értéken tartására (3. ábra) egy nagy pontosságú automata szabályzással, 3 kW elektromos fűtéssel és 80 mm külső szigeteléssel ellátott 120 literes térfogatú zárt rendszerű központi fűtőrendszer (7) került kialakításra. A keringető szivattyú (8) fordulatszáma szabályozható, biztosítja a teljes reaktorrendszer közel állandó üzemi hőmérsékletét, ami a fűtőbojlerbe merülő hőmérő digitális kijelzőjéről olvasható le. A 6 db reaktortartály párhuzamosan van csatlakoztatva a fűtőrendszer előremenő és visszatérő vezetékére. A hővesztés minimalizálása érdekében a vezetékek hőszigetelő burkolattal vannak ellátva.

3.2. A vizsgálatok összeállítása

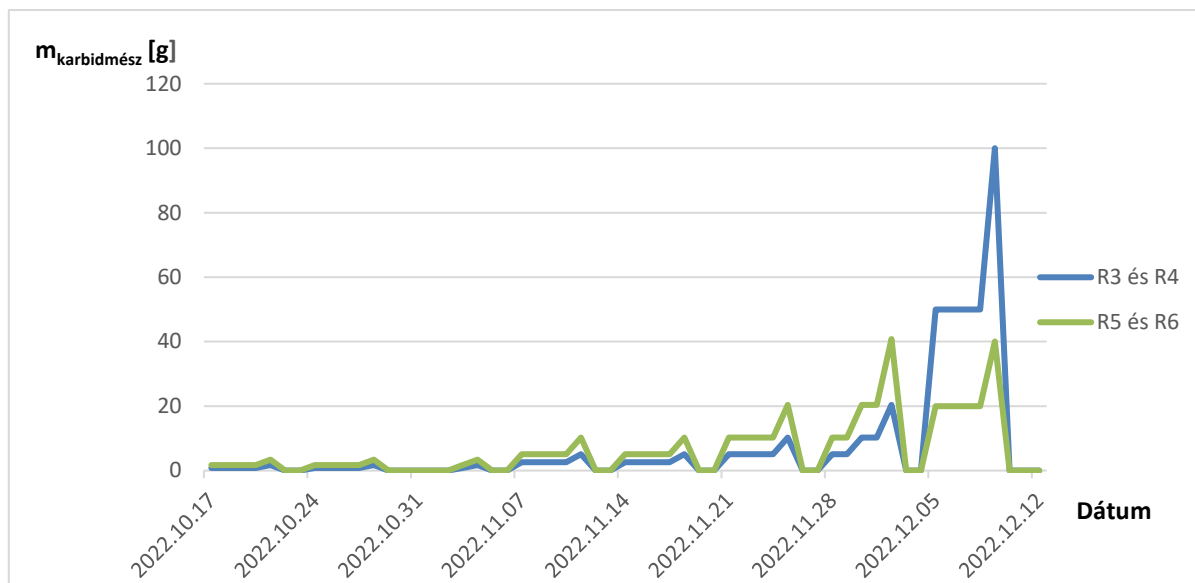
A vizsgálati rendszer reaktorait előzetesen a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep anaerob rothasztóinak recirkulációs vezetékéből (hőcserélők előtt) vett iszappal töltöttük fel.

A művelet során ügyeltünk arra, hogy valamennyi reaktorokba azonos mennyiségű (14-14 L) és azonos minőségű, homogén iszap kerüljön. A vizsgálatokhoz a 2. fejezetben ismertetett karbidmeszet használtuk. Korábbi kutatások alkalmával a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep anaerob reaktorából vett iszapot titráltuk karbidmészszel és meghatároztuk azt a maximális adagolást, amely a rothasztó kémhatását az ammónia toxicitás szempontjából kritikus határig, pH = 8,5 értékig növeli. Az üzemi rothasztók 12 600 m³ hasznos térfogatára ez a maximális dózis 1 260 liter/nap (1 530 kg/nap). Munkánk során a karbidmész kezdeti adagolását ezen értékkel ekvivalens 1,7 g/nap-ban, valamint 0,85 g/nap-ban (50%) határoztuk meg.

A 6 db reaktort 3x2-es felosztásban üzemeltettük, a reaktorpárok tagjai egymás párhuzamosai voltak, az alábbiak szerint:

- R1 és R2 reaktorok: kontroll (vak; kizárólag a Dél-pesti Szennyvíztisztítóban képződő szennyvíziszappal táplálva), karbidmész adagolás nélkül.
- R3 és R4 reaktorok: a Dél-pesti Szennyvíztisztítóban képződő szennyvíziszappal a kontroll reaktorokkal megegyezően táplálva + karbidmész adagolása, kezdetben 0,85 g/nap, majd a dózis nagyobb ütemű emelésével.
- R5 és R6 reaktorok: a Dél-pesti Szennyvíztisztítóban képződő szennyvíziszappal a kontroll reaktorokkal megegyezően táplálva + karbidmész adagolása, kezdetben 1,7 g/nap, majd a dózis kisebb ütemű emelésével.

A vizsgálatok során a szennyvíztisztítóban képződő kevert (nyers + biológiai fölösizap) szennyvíziszap jelentette az alap szubsztrátot, amit elősűrítve adagoltunk be a reaktorokba. Az iszapot minden alkalommal 0,5 mm perforációval ellátott szűrőn engedték át az esetleges dugulást okozó nagyobb darabos szennyeződések és szálak eltávolítása céljából. A reaktorok táplálása, a végtermék eltávolítása, az alkalmazott üzemmenet szerint hétköznaponként naponta egy alkalommal történt. A hétvégüket megelőző utolsó munkanapon (péntek) valamennyi reaktorba a szokásos napi dózis duplája került beadagolásra. Ezzel próbáltuk részben kompenzálni a rátáplálás nélküli hétvégi napokon (szombat-vasárnap) a mikroorganizmusok éhezését.



4. ábra: A reaktorpárokba adagolt karbidmész tömege a vizsgálatok során

A vizsgálat ideje alatt a reaktorpárokba történő karbidmész adagolás ütemét a 4. ábra szemlélteti, a pontos mennyiségeket a 2. táblázat tartalmazza. A hétfővéget megelőző utolsó munkanapon a kétszeres mennyiségű szennyvíziszappal együtt a karbidmészből is a szokásos napi adag duplája került adagolásra. A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep anaerob rothasztóinak összes hasznos térfogatát (12 600 m³) és a vizsgált reaktorok hasznos térfogatát (14 L) összevetve a karbidmész adagolt napi mennyiségei a tisztítóműbe potenciálisan beszállított és a rothasztóba beadagolt mennyiségekkel arányosak a 2. táblázat szerint.

Adagolt mennyiségek a vizsgálatok során [g/nap]	Ekvivalens mennyiségek az üzemi rothasztókba [kg/nap]
0,85	765
1,70	1 530
2,55	2 295
3,40	3 060
5,10	4 590
10,20	9 180
20,00	18 000
40,00	36 000
50,00	45 000
100,00	90 000

2. táblázat: A vizsgálatok során adagolt és ekvivalens üzemi karbidmész mennyiségek

A reaktorrendszer üzemeltetésének napi teendői az alábbiak voltak:

- Karbidmész szuszpenzió adagok kimérése analitikai mérlegen (0,85-10,20 g) vagy táramérlegen (>10,20 g)
- Szennyvíziszap keverék előállítás a gépi iszapsűrítő berendezésre rátáplált (gravitációsan sűrített) iszap és arról elvezetett (gépi sűrített) iszap felhasználásával, mintavétel
- A szennyvíziszap szűrése ~5 mm-es perforációval ellátott szitával (a reaktorrendszer dugulásának elkerülése érdekében)
- Üzemi hőfokok leolvasása, fűtési rendszer ellenőrzése
- A képződött biogáz összetételének mérése mobil biogáz analizátorral
- A műanyag ballonokban összegyűlt (a gázgyűjtő edényekből kiszorított) víz súlyának mérése
- A műanyag ballonok ürítése
- Gázgyűjtő tartályok feltöltése hálózati vízzel
- Rothasztott iszap (fermentációs maradék) leengedése a reaktorokból, a laboratóriummal előre egyeztetett napokon mintavétel a leeresztett iszapokból
- Karbidmész és szűrt szennyvíziszap beadagolása a reaktorokba
- Reaktorrendszer ismételt üzembeállítása, üzemnapló kitöltése, a megvett minták laboratóriumba szállítása

3.3. Ellenőrző laboratóriumi mérések

A 6 db reaktorba betáplált elősűrített iszap szárazanyag-tartalma nagymértéken függ a szennyvíztisztító telep iszapsűrítési technológiájának aktuális beállításától, valamint az iszapkeverék összeállításától, ezért jellemző paramétereinek ismerete elengedhetetlen valamennyi betáplálás alkalmával (3. táblázat). A fermentorok minőségi jellemzői alapvetően lassabban változnak, így hetente 1 alkalommal vizsgáltuk, a mintavételezésre a laboratóriummal leegyeztetett időpontban, hetente egyszer került sor.

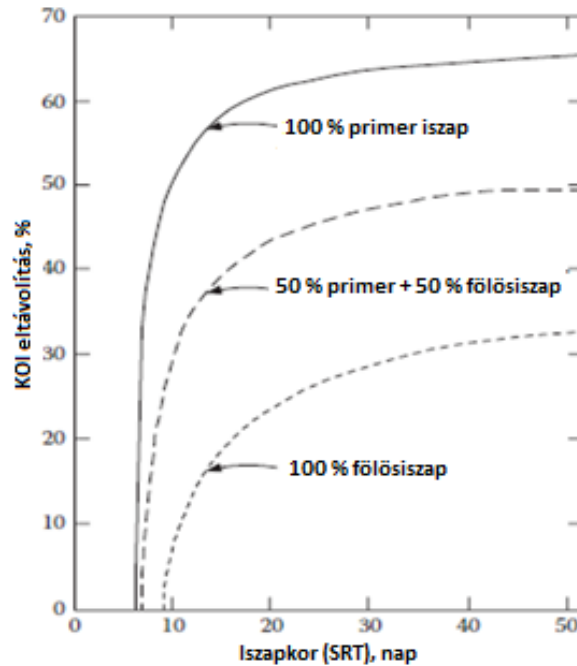
Betáplált iszap hetente 5x	Rothasztott iszap reaktoronként hetente 1x	Vizsgálati módszer, szabvány
száraz anyag	száraz anyag	tömegmérés mérési bizonytalanság: 10 % MSZ EN 12880:2000
izzítási veszteség	izzítási veszteség	tömegmérés mérési bizonytalanság: 10 % MSZ EN 12879:2000
pH	pH	potenciometria mérési tartomány: 2 – 12 MSZ EN 12176:2000
	illó szerves savak	SM (Standard Methods) 5560 C - Organic and volatile acids Distillation Method
	lúgosság	SM (Standard Methods) 2320B - Alkalinity Titration Method

3. táblázat: A laboratóriumi anaerob fermentációs reaktorrendszer ellenőrzésére alkalmazott paraméterek és vizsgálati szabványok

3.4. Eredmények és értékelésük

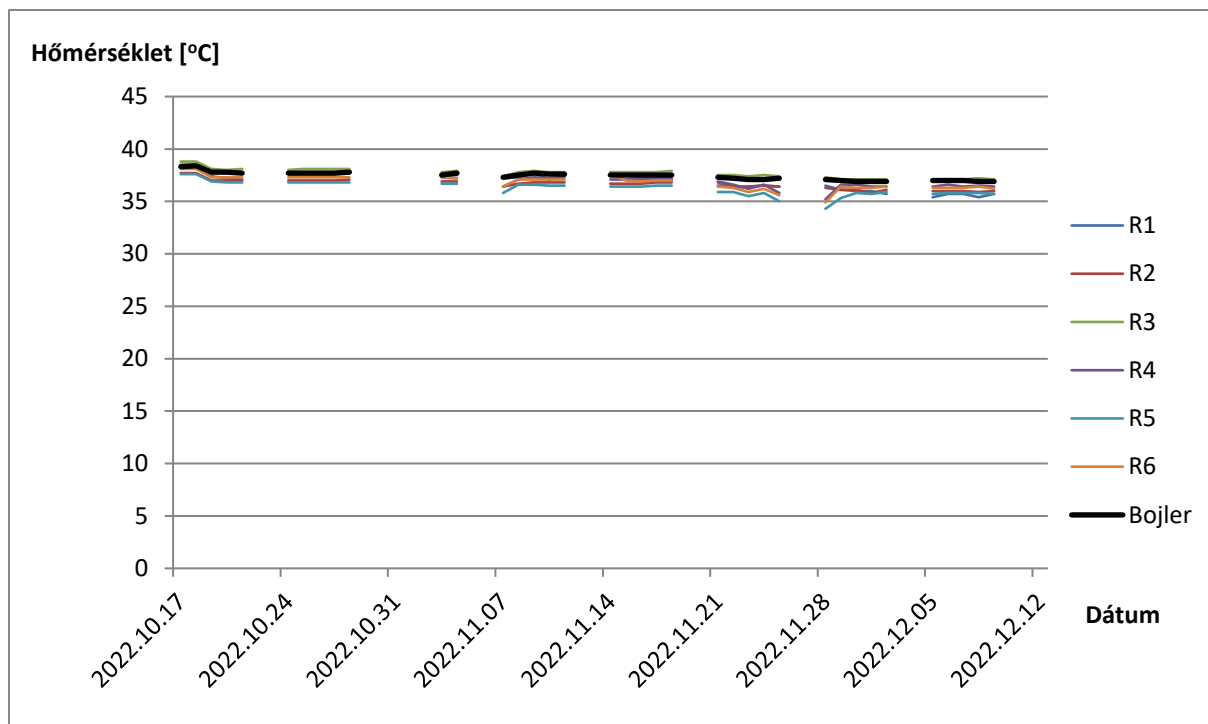
Üzemi hőmérséklet, iszapkor

A szennyvíziszapok mezofil rothasztása során alkalmazott jellemző üzemi hőmérséklet tartomány 35-40 °C, amelyen az iszapkor 16-22 nap (DWA 2016/2019). 15-20 nap iszapkor esetén a betáplált biológiailag bontható partikuláris szerves anyagok 80-90%-a biogázzá alakul, ami megfelel a nyersiszap esetén 60% és a fölős eleveniszap esetén 30-50% szerves szárazanyag-tartalom leomlásának (Grady et al., 2011) (5. ábra).



5. ábra: A fermentorbeli iszapkor és az elérhető KOI (szervesanyag tartalom) csökkenés kapcsolata nyersiszapra, biológiai fölősiszapra és kevertiszapra (Grady et al., 2011)

A reaktorok egyedi PT'100 hőmérséklet érzékelői a reaktortér felől zárt rozsdamentes tokban helyezkednek el, így közvetlenül nem érintkeznek a folyadékfázissal. A tokokban hőközlő anyag nincs elhelyezve, így a hőmérők által szolgáltatott értékek csak tájékoztató jellegű értékeknek tekinthetők. Ezek az értékek a vizsgálatok során jellemzően mindvégig a 35-38 °C tartományban változtak. A reaktorokból hőmérséklet ellenőrzés céljából leengedett (majd visszatöltött) jelentősebb mennyiségű folyadék hőmérsékletét laboratóriumi üveghőmérővel mérve megállapítottuk, hogy az üzemi hőmérsékletek valamennyi esetben a bojler hőmérséklete alatti 1,5 °C széles tartományban voltak (6. ábra).



6. ábra: A reaktorok és fűtőbojler üzemi hőmérsékletei

Az alkalmazott biogáz alapanyagok (szennyvíziszap és ko-szubsztrátok) rendelkezésre állásától és jellegétől függően az üzemi anaerob fermentorokban kialakuló iszapkor is változhat, értéke az Észak-pesti Szennyvíztisztítóban jellemzően 22-25 nap, míg a Dél-pesti Szennyvíztisztító hidraulikailag lényegesen terheltebb rothasztóiban 13-17 nap tartományban van. (Az üzemeinkben alkalmazott rothasztási technológia nem tartalmaz fázisszétválasztást követő iszaprecirkulációt, ezért az iszapkor a hidraulikai tartózkodási idővel azonosnak tekinthető.) Mivel vizsgálataink során iszapelvételekre csak hétköznaponként, naponta egy alkalommal volt lehetőségünk, a számolható iszapkor viszonylag széles tartományban változott. A vizsgálatok teljes időtartamára vonatkozó átlagos iszapkor a reaktorokban 24,9 nap volt.

Rothasztók terhelése

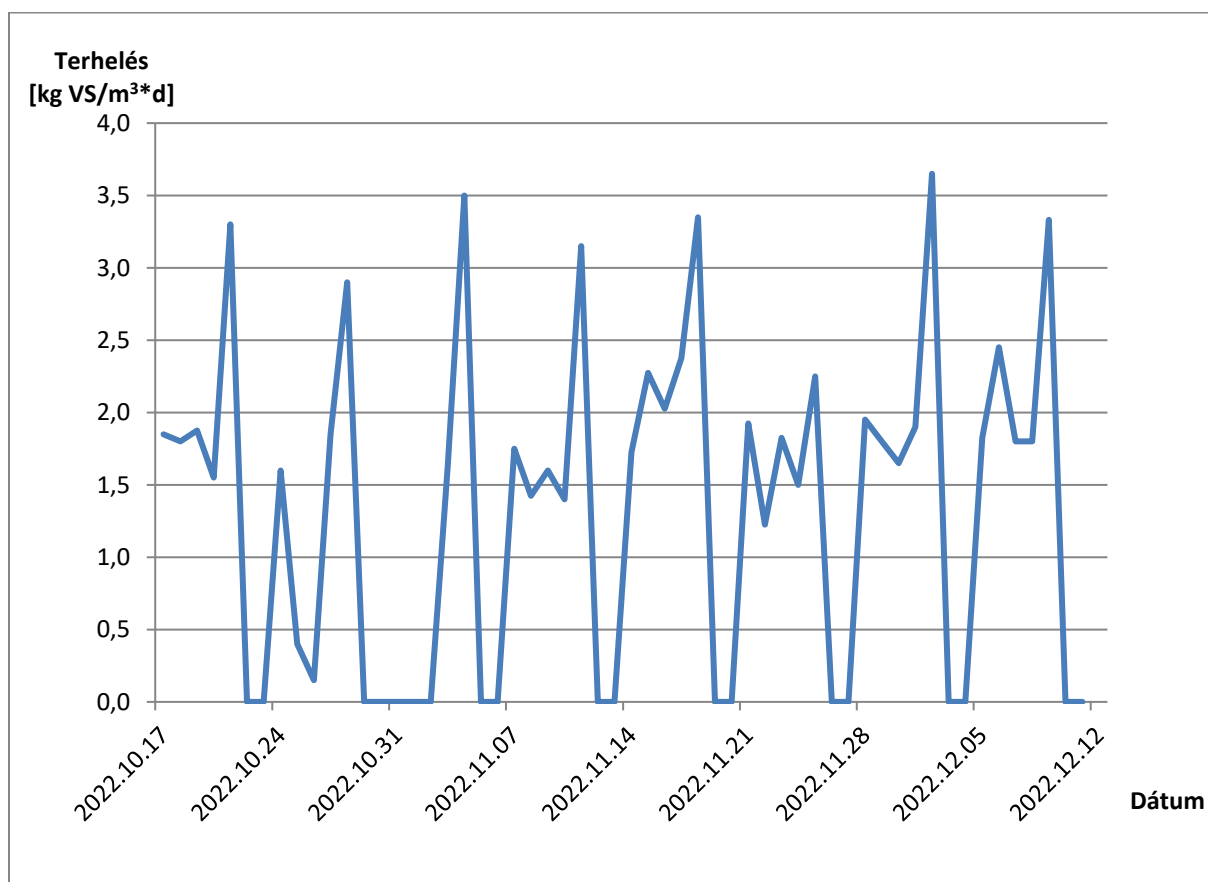
Az alkalmazott rothasztóbeli hidraulikai tartózkodási idő, valamint a vizsgálataink során a reaktorokban elért 1,8-2,8 % iszapkoncentrációk esetén a szakirodalom alapján alkalmazható térfogati szerves szárazanyag terhelés 0,6-1,0 kg VS/m³*d (Metcalf & Eddy, 2013). A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep anaerob rothasztóiban a 4. táblázat szerinti értéktől lényegesen magasabb átlagos terhelést tartunk fenn (2018-2021 évek átlagos értékei 3,4-3,9 kg S/m³*d).

Iszap koncentráció [%]	Szerves szárazanyag térfogati terhelés [kg VS/m ³ *d]			
	10 nap*	12 nap*	15 nap*	20 nap*
2	1,4	1,2	0,95	0,70
3	2,1	1,8	1,4	1,1
4	2,9	2,4	1,9	1,4
5	3,6	3,0	2,4	1,8
6	4,3	3,6	2,9	2,1
7	5,0	4,2	3,3	2,5
8	5,7	4,8	3,8	2,9

* hidraulikai tartózkodási idő

4. táblázat: A rothasztóbeli iszapkoncentráció és a hidraulikai tartózkodási idő hatása a térfogati szerves szárazanyag terhelésre (Metcalf & Eddy, 2013)

A biológiai bontást végző baktériumok hétvégi éhezésének elkerülése érdekében a hét utolsó munkanapjain dupla mennyiségű fermentlé lett leengedve, majd dupla mennyiségű elősűrített kevert iszap lett beadagolva a reaktorokba. A reaktorokban alkalmazott fajlagos terhelés érték (1,5-3,5 kg VS/m³*d) az iszap rátáplálás időszakában lényegesen közelebb áll az üzemi rothasztók jellemző értékeihez, mintsem a szakirodalmi ajánláshoz. Ugyanakkor a vizsgálat teljes időtartamára (a hétvégi rátáplálás nélküli időszakot is figyelembe véve) számított átlagos terhelés 1,3 kg VS/m³*d, ami lényegesen jobban közelíti a szakirodalmi adatokat (7. ábra).



7. ábra Reaktorok térfogati szerves szárazanyag terhelése

A képződő biogáz összetétele

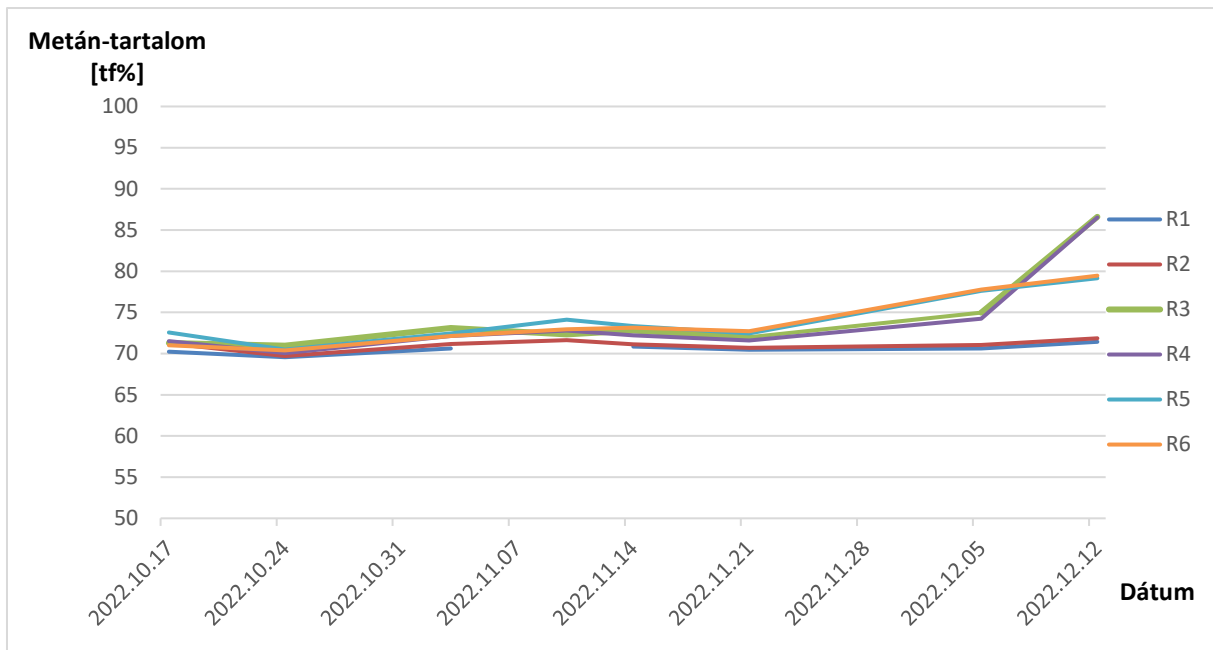
A reaktorokban képződő biogáz jelentős mennyiségű párárt tartalmazott, illetve a tározóból kiáramolva nagy mennyiségű kondenzátumot vitt magával, ez zavarta volna az analizátor működését, ezért egy kondenzációs edényt majd vízleválasztó szűrőt szereltünk az analizátor szívóvezetékébe (2. fénykép).



A gázgyűjtő tartályokban összegyűlt biogáz összetételét Goliath Esders mobil biogáz analizátor csatlakoztatásával határoztuk meg. Az analizátor gázfogyasztása ~10 liter/perc, ezért a tartályhoz csatlakoztatva abból 1-2 perc alatt kiszívja az összegyűlt biogázt, aminek helyére a tartály alsó csatlakozási pontján keresztül levegő érkezik, átbuborékolva a tartályban maradt vízrétegen. A beáramló levegő a gázzal keveredve hígítja azt, amit az oxigén koncentrációjának emelkedése jelez. A mérési eredményeket akkor olvastuk le, amikor az oxigén tartalom a lehető legalacsonyabb, míg a metántartalom a legmagasabb értéket érte el. A biogáz tényleges metán, szén-dioxid és kén-hidrogén koncentrációi az oxigéntartalom figyelembevételével számíthatók.

2. fénykép: Biogáz analizátor és vízleválasztó rendszer

Tapasztalataink azt mutatják, hogy a képződött biogáz összetétele csak abban az esetben határozható meg jó közelítéssel, ha térfogata meghaladja a 15 litert. Ez a gázmennyiség általában a hétféle kétszeres mennyiségű szubsztrát rátáplálását követő első munkanapon állt rendelkezésre, így a mérések elvégzésére is ekkor volt lehetőség. A karbidmész adagolt mennyiségének növelésével a képződő biogáz mért és számítással meghatározott metántartalma is növekedett a kontroll reaktorokhoz képest (8. ábra). A változás különösen november 21-ét követően, az utolsó két mérés alkalmával vált szignifikánssá. A kontroll fermentorokban (R1 és R2) termelődő biogáz metántartalma mindvégig 69-72 tf% tartományban ingadozott. Az R3 és R4 reaktorokban a karbidmész napi dózis drasztikus mértékben, 5,1-ről 50 g-ra történő emelésével párhuzamosan a metántartalom 86-87 tf%-ra nőtt. Az R5 és R6 reaktorokban a mész adagolás lényegesen kisebb ütemben lett emelve, 20 g/nap adagolás esetén a metán koncentráció a képződő biogázban 79-80 tf%-ra emelkedett.

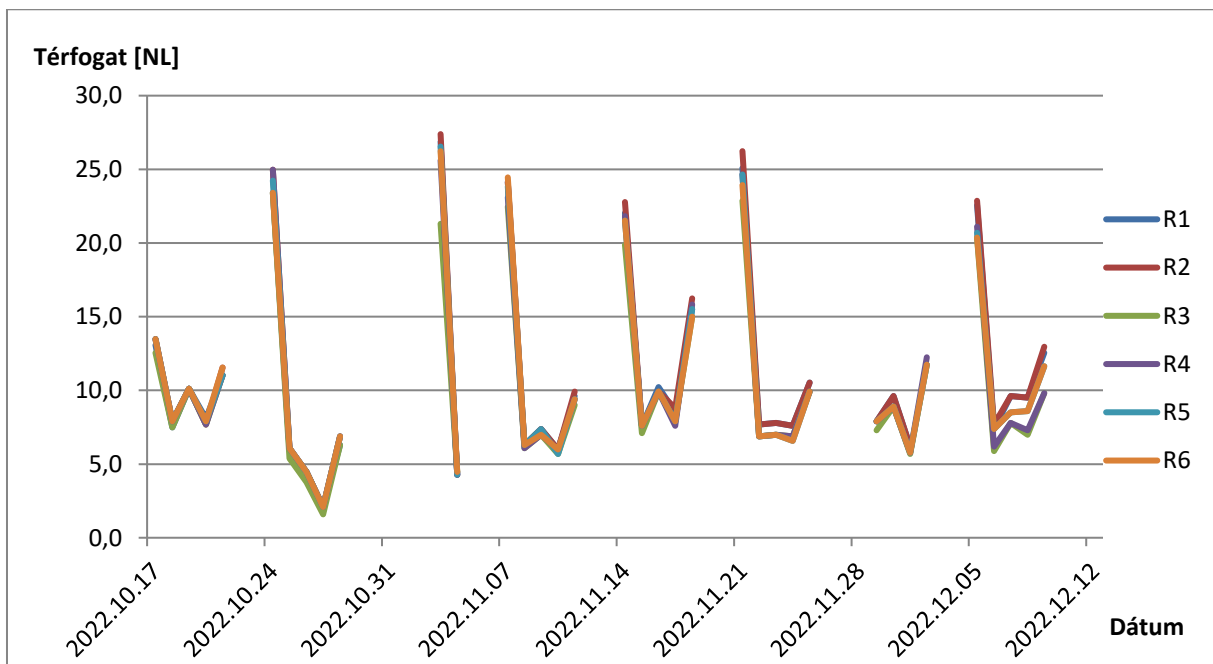


8. ábra: A reaktorokban képződő biogáz metántartalma

A rothasztók túlterhelését jelezheti a biogáz szén-dioxid tartalmának növekedése (> 30 tf%) (Öllös *et al.*, 2011). Ez a vizsgálatok során egyetlen alkalommal sem fordult elő egyik reaktor esetén sem.

A képződő biogáz hozama

Az R3 reaktor esetén a tökéletes gáztömörséget a vizsgálatok teljes időtartama alatt vélhetően nem sikerült folyamatosan biztosítani, amit a párhuzamosan üzemeltetett R4 reaktorhoz viszonyított alacsonyabb gázhozam jelez. Ezért a biogáz hozamot érintő összehasonlítás során R3 reaktort figyelmen kívül hagyjuk.

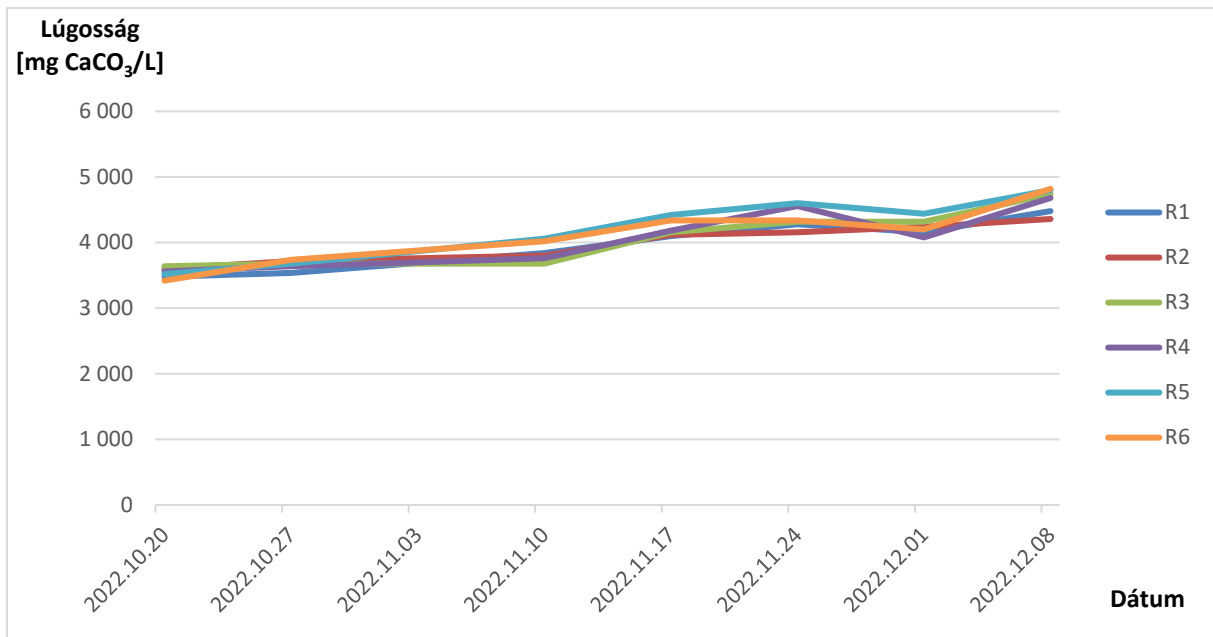


9. ábra: A reaktorokban képződő biogáz térfogata normál állapotra vonatkoztatva

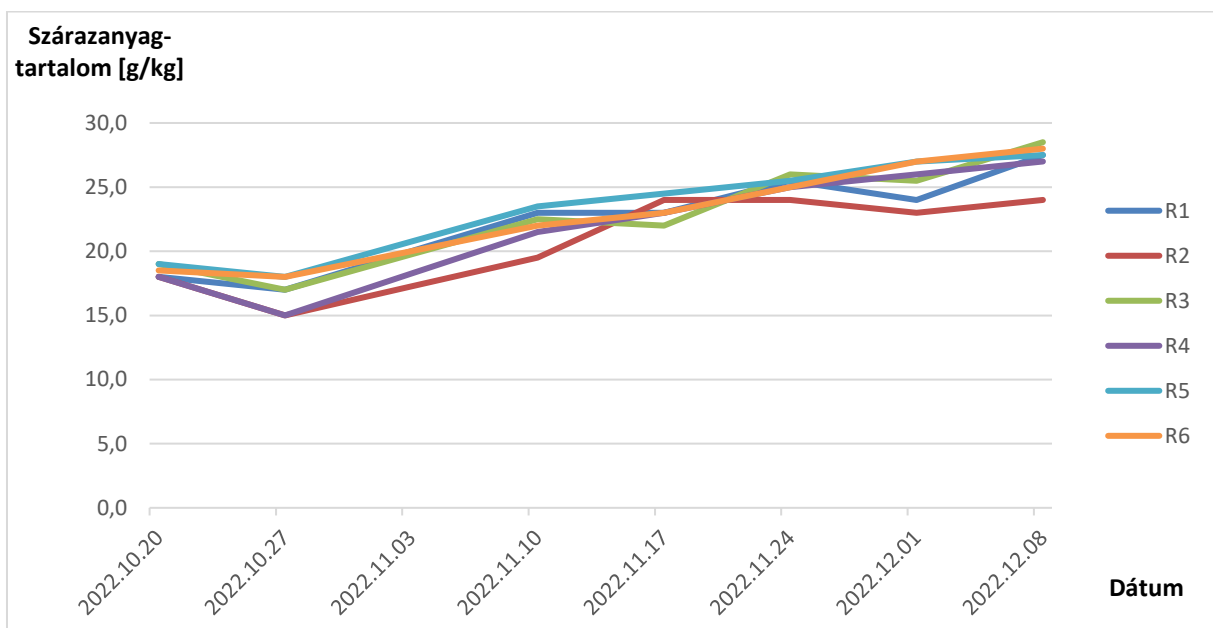
A képződő biogáz által a gázgyűjtő tartályokból kiszorított víz súlyát naponta mérésrel határoztuk meg. A környezeti tényezők (hőmérséklet és nyomás) ismeretében számoltuk a biogáz normál térfogatát. Az eredmények azt mutatják, hogy a karbidmész adagolt mennyiségének növelésével a képződő biogáz hozama csökkent a kontroll reaktorokhoz képest (9. ábra). A változás ebben az esetben is november 21-ét követően vált szignifikánssá. Az R3 és R4 reaktorokban a karbidmész napi dózis drasztikus mértékben, 50 g-ra történő emelésével párhuzamosan a biogáz hozam csökkenése 20-26% volt. Az R5 és R6 reaktorokban a karbidmész adagolás lényegesen kisebb ütemben lett emelve, 20 g/nap adagolás esetén a gázhozam csökkenés mértéke 9-12% volt. A karbidmész adagolás mértékével arányosan a képződő biogáz metán-tartalmában bekövetkező növekmények százalékos értékei közelítőleg megegyeznek a termelő biogáz mennyiségének százalékos csökkenéseivel. A két változás ellentétes, a metán termelés tekintetében közelítőleg kioltják egymást. Így összességében megállapítható, hogy a termelő metán mennyisége független a karbidmész adagolástól.

Rothasztó paraméterek ellenőrzése

Az anaerob fermentáció komplex többlépcsős folyamatának leginkább érzékeny mikroorganizmusai a metántermelést végző organizmusok, amelyek aktivitása a betáplált biogáz alapanyagok minőségének, mennyiségének megváltozása, a reakció környezeti tényezőinek (pH, hőmérséklet stb.) változása, toxikus anyagok jelenléte esetén csökkenhet. Ennek eredményeként a többlépcsős folyamat egyensúlya felborul, a képződött illékony zsírsavak (pl. ecetsav) felhasználásának sebessége csökken, azok a rendszerben felhalmozódnak. Ezt a fermentorban mérhető illékony zsírsavak koncentrációjának emelkedése jelzi. A rothasztók folyadékfázisának pufferkapacitása (lúgosságként mérhető), kompenzálja a felhalmozódó savaknak a kémhatás (pH) csökkenésére gyakorolt hatását. A nagy lúgosság egyúttal mintegy biztosítja annak, hogy a rendszerben nem következhet be könnyen pH ingadozás. A Na^+ , K^+ , Ca^{2+} és Mg^{2+} ionok, valamint az ammónium a bikarbonátokkal kielégítő puffer-kapacitást biztosítanak a rendszerben. A legfontosabb pufferhatású vegyület az NH_4HCO_3 . Az üzemi gyakorlatban az egyensúlyi viszonyok jellemzésére használják az összes illósav (mg ecetsav/L) és a lúgosság (mg CaCO_3 /L) arány számát is. Az egyensúly felborulása akkor következik be, ha ez az arány nagyobb, mint 0,8. Az optimális arányszám 0,1 – 0,2 értékek között van (Öllős et al., 2011). A vizsgálat időtartama alatt a reaktorokban a lúgosság értéke 3400 – 3600 mg CaCO_3 /L tartományból a 4400 – 4800 mg/L-re emelkedett (10. ábra). A kontroll és a karbidmész adagolással érintett egységek közt egyértelmű eltérés nem figyelhető meg. A lúgossággal összhangban változik a fermentorok szárazanyag koncentrációja (11. ábra). Feltételezzük, hogy a változást a rothasztókba táplált szennyvíziszap eredményezte.

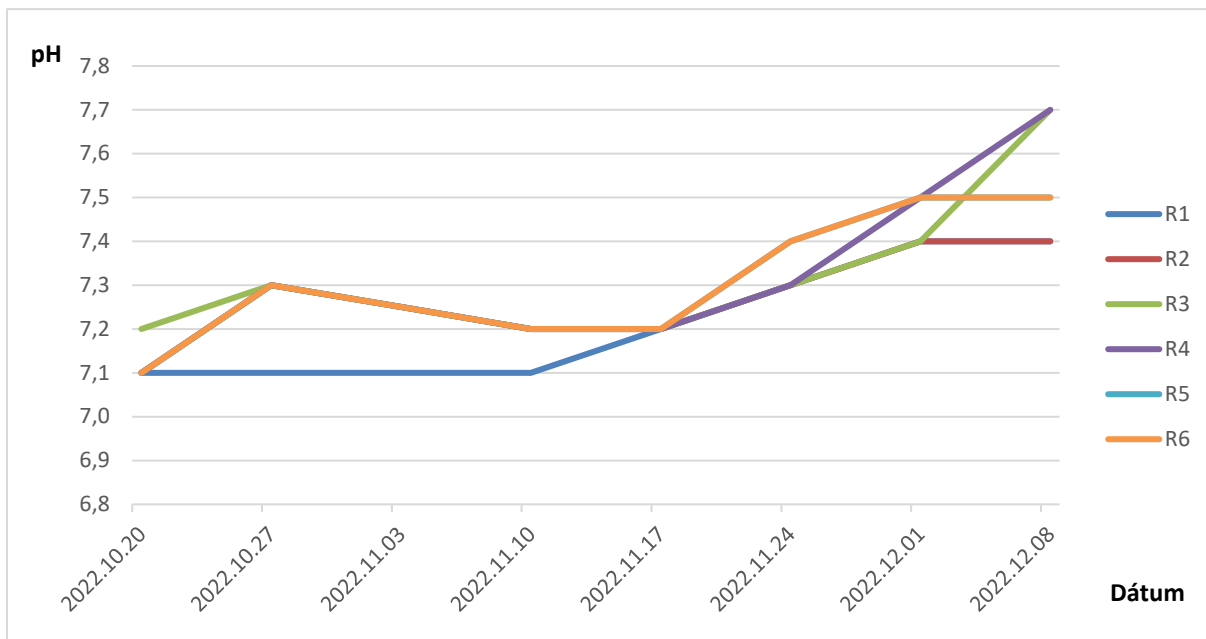


10. ábra: A reaktorokból meghatározott lúgosság változása

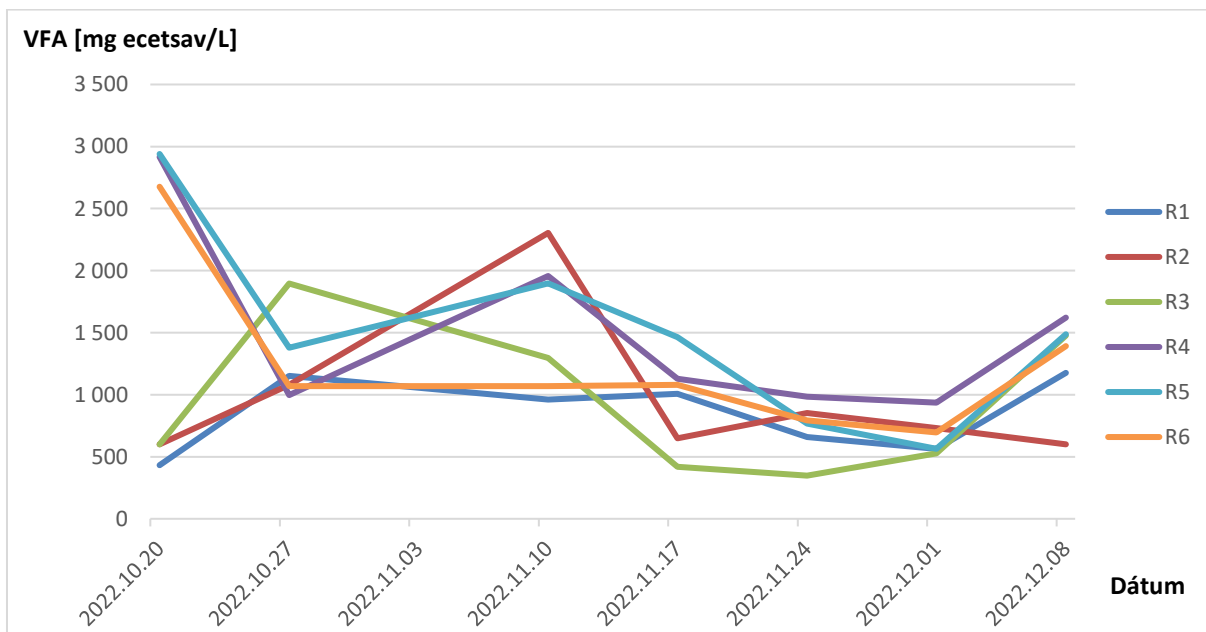


11. ábra: Száranyag-tartalom változása a reaktorokban

A reaktorokban mérhető kémhatás (12. ábra) is tendenciózus növekedést mutat, különös tekintettel a karbidmész fokozott adagolásával terhelt R3 és R4 reaktorok esetén, amelyek pH-ja az utolsó vizsgálatra elérte a 7,7 értéket. Vélhetően a lúgos karakterű karbidmész adagolás nagyarányú fokozásának hatásait az adott reaktorok pufferkapacitása már nem volt képes megfelelő mértékben csillapítani. Az adatokból úgy tűnik, hogy a folyamat egyensúlya 10,2 g napi karbidmész dózis esetén még biztosított volt. Az üzemi rothasztók összes hasznos térfogatára vonatkoztatva az ekvivalens karbidmész adagolás 9,2 tonna/nap. Az illékony zsírsavak mért koncentrációi (13. ábra) jelentős szórást mutatnak a párhuzamosan üzemelő reaktorok között is.

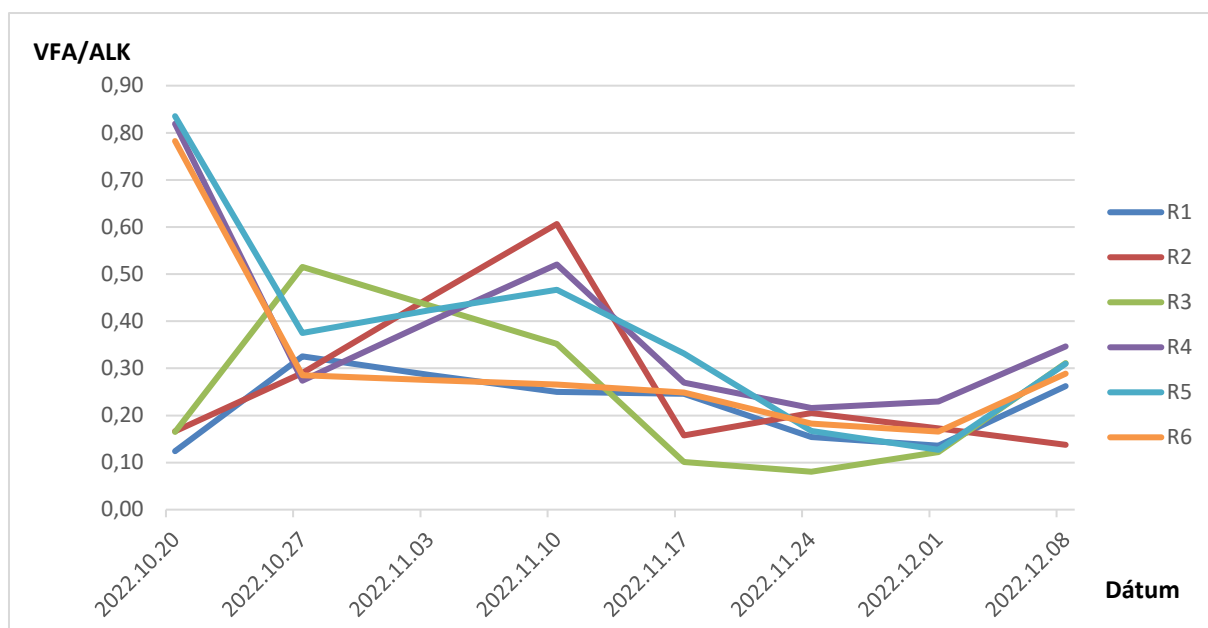


12. ábra: A kémhatás változása a reaktorokban



13. ábra: Illékony zsírsavak koncentrációjának változása

Az értékek vizsgálatonként rapszodikusán változnak, a karbidmész adagolással összefüggő tendencia egyik reaktor esetén sem fedezhető fel. Természetesen hasonló eredményre jutunk az illósv/lúgosság arány vizsgálatakor is (14. ábra). Mivel a lúgosság és a kémhatás a fermentáció stabilitása szempontjából kedvező irányba változtak, ezért az illékony zsírsav koncentrációkat az értékelés során figyelmen kívül hagyjuk.



14. ábra: Illékony zsírsavak és lúgosság hányadosa

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során vizsgáltuk az ipari melléktermékként képződő karbidmész szuszpenzió hasznosítási lehetőségeit a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep technológiájában abból a szempontból, hogy az adagolásra mely technológiai egységben van lehetőség, várható-e közvetlen technológiai előny, avagy hátrány.

A tisztítómű nagyterhelésű eleveniszapos biológiai fokozatába történő karbidmész adagolás alkalmazhatóságának felmérése során vizsgáltuk a baktérium pelyhek ülepedési tulajdonságaira gyakorolt hatást. Az adagolt dózisok esetén az eleveniszap ülepedésére jellemző iszaptérfogatai a kontrolhoz képest jelentős eltérést nem mutattak, a karbidmész adagolásának egyértelműen kedvező hatása nem volt.

A karbidmész adagolást követően az eleveniszapból ülepítéssel és szűréssel elválasztott vízfázisban az orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ koncentráció 2,00 és 4,00 mL 100x-os hígítású karbidmész dózis adagolása mellett csökkent. Az utóbbi dózis 1 m³ szennyvízhez 47,2 g karbidmész (szárazanyag = 9,35 g) adagolásának felel meg, a méréshez használt szennyvíz minta kiindulási orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ -koncentrációja 0,47 mg/L volt, 4,00 mL 100x-os hígítású karbidmész adagolás után a szűrtlet orto- $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ -koncentrációja 0,17 mg/L volt. E dózis fölött a fajlagos foszfor kicsapatás jelentős csökkenést mutatott.

A szennyvíztisztítóknak a foszfor kicsapatás céljából jelenleg adagolt vas(III)-kloridnak tapasztalataink szerint jelentős szerepe van a nagyterhelésű, alacsony iszapkorú, ezáltal gyenge pehelyszerkezettel rendelkező eleveniszap hatékony fázisszétválasztásának fenntartásában az utóülepités során. Mivel a foszfor kicsapatásban betöltött szerepén túl a vizsgált adagolási tartományban a karbidmész nem javította az eleveniszap ülepedési tulajdonságát, ezért üzemi alkalmazása a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep eleveniszapos egységében nem tűnik célszerűnek.

Laboratóriumi fermentációs reaktorrendszerben vizsgáltuk különböző koncentrációban adagolt karbidmész hatását a tisztítóműben képződő, elősűrített kevert szennyvíziszap

anaerob lebontására, a képződő biogáz hozamára és összetételére, illetve a folyamat stabilitására.

A vizsgálatok során a karbidmész adagolt mennyiségének növelésével a képződő biogáz hozama csökkent, ezzel egyidejűleg a képződő biogáz metántartalma növekedett a kontroll reaktorokhoz képest. A metántartalomban bekövetkező növekmény százalékosan közelítőleg megegyezett a gázhozam százalékos csökkenésével. Az ellentétes irányú változások a metán termelődés tekintetében közelítőleg kioltották egymás hatását. Összességében megállapítható, hogy a termelődő metán mennyisége közelítőleg független volt a karbidmész adagolásától a vizsgált tartományban.

A lúgosság és kémhatás enyhe emelkedése a karbidmész adagolással érintett reaktorokban is megfigyelhető volt. A karbidmész adagolás nagyarányú emelésének hatására az adott reaktorok kémhatása tovább emelkedett, ami vélhetően az egyensúly eltolódására utal. Az adatokból úgy tűnik, hogy a folyamat stabilitása pH = 8,5-ig, 10,2 g karbidmész/nap adagolás esetén még biztosított volt, ami 0,73 kg karbidmész/m³ hasznos térfogat dózisa felelt meg a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep esetében. Az üzemi rothasztók összes hasznos térfogatára vonatkoztatva ezzel ekvivalens karbidmész adagolás 9,2 tonna/nap.

5. IRODALOMJEGYZÉK

Bakosné Diószegi, M., Tupa, B., Bakos, I. (2019): Biogas Research Opportunities at Óbuda University. Óbuda University e-Bulletin, 9(1), 19-22.

Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. (2021): Laboratóriumi méretű fermentációs reaktorrendszer kialakítása, üzemeltetése és ellenőrzése, Kutatási berendezések és mérések gyűjteménye (Digitális adatbázis)

Grady Jr, C. P. L., Daigger, G. T., Love, N. G., Filipe, C. D. M. (2011): Biological wastewater treatment, Biological wastewater treatment, Third Edition, CRC Press

DWA (2016/corrected 2019) Topics Design of wastewater treatment plants in hot and cold climates

Metcalf & Eddy, AECOM (2013) Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery-McGraw-Hill

Oláh, J., Öllős, G., Palkó, G., Rása, G., Tarjányné Szikora, S. (2011): Anaerob lebontás alap-folyamata és a rothasztók ellenőrzése II. Vízmű Panoráma