MISKOLCI EGYETEM

ANYAG- ÉS VEGYÉSZMÉRNÖKI KAR

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

3515 MISKOLC Egyetemváros

Vízi növények biogáz alapanyagként történő hasznosításának vizsgálata

Examination of biogas production from aquatic plants

Készítette:
Varga Dániel

Konzulens:
Dr. Nagy Gábor

adjunktus

Energia- és Minőségügyi Intézet

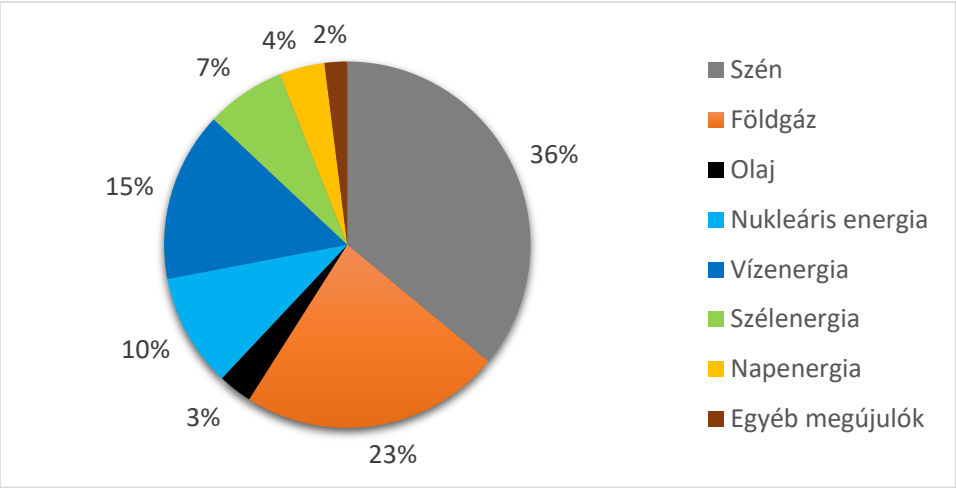
2022

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés ... 1
2. A biogáz ... 2
2.1. A biogáz keletkezése ... 2
2.2. Biogáztermelés világviszonylatban ... 4
2.3. A biogáz előállítás alapanyagai ... 5
2.4. A trágya, mint alapanyag ... 6
2.5. Közös fermentáció ... 8
2.6. A vízinövények szerepe ... 9
2.6.1. Úszó kagylótutaj ... 12
2.6.2. Széleslevelű gyékény ... 13
2.6.3. Vízi rucaöröm ... 14
2.6.4. Közönséges valiznéria ... 14
3. A kísérlet ... 15
3.1. A kísérleti rendszer fejlesztése ... 15
3.2. Az alkalmazott berendezések bemutatása ... 19
4. Eredmények bemutatása ... 19
4.1. Alapanyag vizsgálatok eredményei ... 19
4.2. Gázhozam vizsgálata ... 21
4.3. Gázösszetétel vizsgálata ... 26
5. Összefoglalás ... 29
6. Irodalomjegyzék ... 30

1. Bevezetés

A folyamatosan emelkedő energiaigény és a jelenleg kialakult energiaválság is a megújuló energiaforrások elterjedésének felgyorsítására ösztönöz. A globális energiamixben (1. ábra) 2021-ben a legnagyobb növekedést a nap- és szélenergia mutatta, melyek együttesen a globális villamosenergia termelés több, mint 10%-át adták. A tiszta energiaforrások összesen a világ villamosenergia termelésének 38%-át fedezték, túllépve ezzel a szén 36%-át. A növekvő tendenciájuk viszont kevés ahhoz, hogy fedezze az energiaigény éves 5,4%-os emelkedését. Ennek következtében a nap és szélenergia mellett a szénfelhasználás mennyisége is nőtt az elmúlt évekhez képest, amely az energiaszektor rekord mennyiségű CO_2 kibocsátását eredményezte [1].

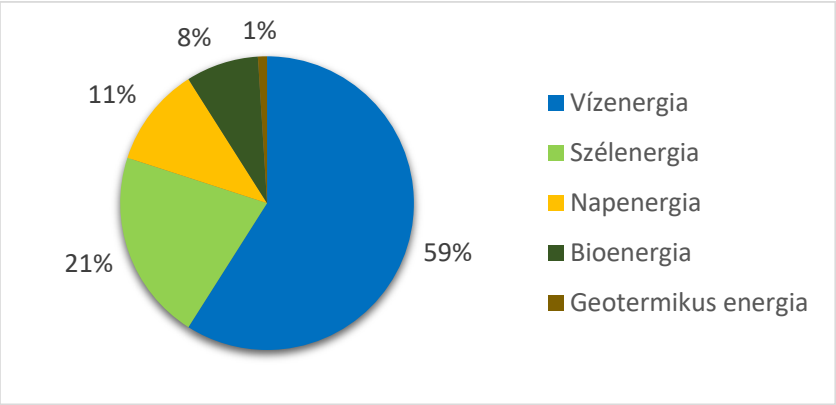


1. ábra
A globális energiatermelés megoszlása 2021-ben [1], [2]

Európában az energiaszektor felelős a kibocsátott üvegházhatású gázok 75%-áért. A megújuló energiaforrások mennyiségének növelése elengedhetetlen az EU energia- és klímaterveinek megvalósításához. Ezen felül a megújulókra való mihamarabbi áttérést sürgeti a REPowerEU tervezet, amely nagy mértékben csökkentené Európa függését az oroszországi fosszilis energiahordozóktól. Ennek 3 fő pillére: energia megtakarítás, tiszta energia előállítása és az EU energiaforrásainak szétosztása. A tervezet szerint a megújulók aránya annak iparban, a közlekedésben és energia termelésben történő elterjesztésével 2030-ra elérné a 45%-ot [3].

A megújuló energiaforrások 2020-as megoszlása [4] látható világviszonylatban a 2. ábrán. Látható, hogy a zöldenergia több, mint felét vízerőművek szolgáltatják, amelyek mennyisége az elmúlt évek során csak nagyon kis mértékben nőtt. Ezzel szemben a nap- és szélenergia terjed világszerte a legnagyobb ütemben, 2016 óta 73%-kal. A bioenergia 70%-a biomassza tüzelésből, 16%-a biogázból, 13%-a kommunális hulladékból és 1%-a folyékony bioüzemanyagokból származik. Ez alapján

elmondható, hogy a biogáz egy viszonylag kiaknázatlan energiaforrás, melynek fokozott előállítása szükséges lenne az energiaigényünk biztosítása érdekében.



2. ábra
A globális megújuló energiaforrások megoszlása 2020-ban [4]

2. A biogáz

Az egyik megújuló energiahordozó, a biogáz anaerob elbontás (fermentáció) eredményeként keletkezik, amely biológiai folyamatok sorozatán keresztül képződik mikroorganizmusok által oxigénmentes környezetben. A mikroorganizmusok a szerves anyagokat bontják le, melynek melléktermé a biogáz [5]. Ez alapanyagtól függően 50-75%-ban metánt, 25-50%-ban szén-dioxidot és nyomokban egyéb gázokat tartalmaz, mint a nitrogén, kén-hidrogén, ammónia és hidrogén [6].

A biogázgyártás számos előnnyel rendelkezik [7]:

- Alapanyagai főként hulladékok, tehát gyakorlatilag ingyen, nagy mennyiségben állnak rendelkezésre
- Az anaerob bontást követően az eredeti állapothoz képest az alapanyag semennyit sem veszít tápanyagtartalmából
- A folyamat során az alapanyag szaghatása számottevően lecsökken
- Megújuló energiaforrásnak minősül
- A szükséges technológia relatívan olcsó és egyszerű

2.1. A biogáz keletkezése

A szerves anyagok lebontása három lépésben történik. Biogáztermelés szempontjából jól hasznosítható anyagnak számítanak a cukrok, zsírok és a keményítő. Első lépésben a hidrolizáló mikroorganizmusok ezen anyagokat bontják alkotóelemeikre, így egyszerű cukrok, zsírsavak és aminosavak keletkeznek [8], [9]. A második lépés az ecetsav képződés, amiért az acetogén

mikroorganizmusok felelnek. Ezek a hidrolizáló baktériumok által termelt anyagokból állítanak elő acetátot és hidrogént. A képződő metánmennyiség közel 70%-a az acetátból keletkezik, a hidrogén pedig redukálószerként hasznosul a harmadik lépésben. Ez a szigorúan anaerob körülmények között lejátszódó metanogenezis, amelynek folyamán a metanogén baktériumok metán és szén-dioxid keverékét, azaz biogázt állítanak elő [9].

A biogáz termelés hatásfokát számos tényező befolyásolja:

1. Hőmérséklet

   Általában a növekvő hőmérséklet hatására a reakciósebesség is nő, mely a biogáztermelés esetében is igaz. Az anaerob bontás két hőmérsékleti tartományban zajlik: a mezofil mikroorganizmusok számára a 30-40 °C-os, míg a termofilek számára a 45-55 °C-os hőmérsékleti intervallum az optimális [10].

2. Szén/nitrogén (C/N) arány

   Fontos tényező az alapanyag szén/nitrogén aránya, amely 20/1 és 30/1 intervallumban optimális. A túl magas C/N arány a metanogén mikroorganizmus-populáció túlzott növekedését eredményezi, ennek következtében lecsökken az alapanyag maradék széntartalma, mely a gáztermelés csökkenését, majd leállását eredményezi. A túl alacsony C/N arány a képződő biogázban magas ammóniatartalmat okoz, mely mérgező a metanogén baktériumok számára, így alacsony metántermeléshez vezet [10].

3. A reaktor felépítése

   Egyes paraméterek esetében fontos, hogy folyamatosan mérhetők, nyomon követhetők legyenek. Ilyen a reaktorban lévő biomassza mennyisége, a fellépő hibák és a mikroorganizmusok jóléte, amely a hatékony és optimális gáztermeléshez elengedhetetlen. A keletkező gáz összetétele és mennyisége információt biztosít a reaktorban maradó biomassza mennyiségéről, valamint arról, hogy mikor szükséges új biomasszát beadagolni. A gázt vizsgálva továbbá észlelhetők a különböző, a gáztermelést befolyásoló rendellenességek, mint a pH, vagy a hőmérséklet változása [10].

4. pH

   Az acetogén baktériumok leginkább 5-ös pH mellett a leghatékonyabbak, míg a metanogének 6,2 felett. Általánosságban a reaktorokban a 6,8-7,2-es pH közötti érték elérése a cél. Az ettől való eltérés túl savas vagy bázikus közeget eredményez, mely negatív hatással lesz a gázképződésre. Fontos, a mikroorganizmusok számára megfelelő környezet megteremtése és fenntartása, hiszen nélkülük nem képződhet biogáz [10] .

5. Mérgező anyagok

   A mérgező anyagok olyan antibiotikumokat és egyéb bomlástermékeket foglalnak magukban, melyek a metanogenezis folyamatát gátolják, csökkentve így a metántermelést és növelve az illékony savak koncentrációját. Alacsony C/N arány esetében a legvalószínűbb, hogy a baktériumok számára savas közeg alakul ki, ezért fontos ennek elkerülése [10].

6. A beadagolás ideje

   Az alapanyag beadagolásának mértéke a naponta berakott illó szilárd anyag és a reaktor térfogatának arányából adódik. A magasabb arány magasabb metántermelést eredményez [10].

7. Redox-feltételek

   A reaktorban lévő metanogén baktériumok az optimális működéshez redox-feltételeket igényelnek -300 és -330 mV intervallumban [10].

2.2. Biogáztermelés világviszonylatban

A világon található biogáztelepek számát már 1983-ban is 9 millióra becsülték, melyből 7,5 milliót a Távol-Keleten található, túlnyomórészt kisméretű üzemek tettek ki [9]. Jelentős fejlődést az előző évtizedben tapasztalhattunk, amikor a globális biogáz alapú villamosenergia-termelés kapacitása 90%-os növekedést mutatott [10]. Napjainkban Kína rendelkezik a legtöbb biogáz üzemmel, ez legalább 108 000 ipari méretű és nagyszámú (~42 millió [5]) háztartási méretű reaktorból áll. Ezek együttesen több, mint $1{,}12 \times 10^{10}$ m^3 [11] éves termelési kapacitással rendelkeznek, amely a globálisan előállított biogáz mennyiségének közel felét teszi ki [12]. A reaktorok különféle alapanyagokat dolgoznak fel: marha- és baromfitrágya, szalma, települési szennyvíz, kommunális hulladék, mezőgazdasági- és élelmiszerhulladék. Az előállított biogázt főként lakossági gázként vagy villamosenergia előállításra használják fel [11].

Európában 2020-ban közel 19 000 db [13] biogáz üzem működött, melyek a globálisan előállított biogáz mennyiségének 50%-át biztosították. Itt a vezető biogázgyártók Németország, Svájc, Svédország és az Egyesült Királyság [9], [11]. A világon Kína után Németországban található a legtöbb biogáz üzem, melyek száma meghaladja a 10 000 darabot. Ezek éves hozama az európai biogáztermelés több, mint 50%-át teszi ki [14]. Az Európában található reaktorok alapanyagai túlnyomó részt hulladéklerakókból származnak, a keletkező biogázt a legtöbb országban hő- és villamosenergia előállítására fordítják, néhány esetben annak jármű üzemanyagként történő felhasználása terjedt el [11].

A hazánkban található biogáz üzemek száma az európai országokhoz képest viszonylag alacsony. A 40 db erőmű közül a legjelentősebb Nyírbátorban található, amely évente átlagosan $8{,}2 \times 10^6$ m³ biogázt állít elő [15].

A 2050-re tervezett karbonsemlegesség eléréséhez a megújuló energiaforrások elterjedése kulcsfontosságú lesz, ezen belül pedig fontos szerepet játszhat a biogáz előállítás. Ebben Kína a jövőben nagy valószínűséggel élen járó marad. Ezt a bőségesen rendelkezésre álló állati trágya, biológiailag bontható szilárd kommunális hulladék és termés maradvány készletek, valamint a kisebb mennyiségben rendelkezésre álló kommunális szennyvíziszap készlet teheti lehetővé. Továbbá célja 2030-ra $3{,}0 \times 10^{10}$ m³ biometán előállítása, amivel a vidéki közösségek szén igényét váltaná ki [12].

Az Európai Unió két mérföldkövet állított biometán előállítást illetően, ez 2030-ra évi $3{,}5 \times 10^{10}$ m³, valamint 2050-re $9{,}5 \times 10^{10}$ m³. Számítások alapján ezen célok eléréshez elegendő mennyiségű biogáz alapanyag (állati trágya és mezőgazdasági hulladék) áll rendelkezésre. Előreláthatólag a legnagyobb biogázgyártók Németország, Franciaország, Olaszország, Lengyelország és Spanyolország lesznek [16]. Érdemes figyelmet fordítani más európai országok terveire is, ilyen Finnország és Hollandia. Előbbi a tejipar karbonsemlegesítését tűzte ki célul 2035-re. A terv része a tehéntrágyából történő biogáz előállítás, valamint biometán-üzemű tartálykocsik használata. Hollandia 2050-re a teljes földgáz felhasználásának biogázzal és hidrogénnel történő helyettesítését tervezi. Ezt nagy mértékben segíti a nagyszámú állatállománya, ami lehetővé teszi a jelenlegi biogáz termelésének megduplázását. A biometánt továbbá közlekedési eszközök hajtására, főként nehéz tehergépkocsik esetén és a belvízi hajózásban tervezik üzemanyagként használni [17].

2.3. A biogáz előállítás alapanyagai

A biogáz előállítására szinte az összes szerves anyag alkalmas, a leggyakrabban használt alapanyagok az állati trágya, mezőgazdasági melléktermékek (növények szárai), háztartási zöldhulladék, ipari és kereskedelmi hulladékok (bioüzemanyagok gyártásából keletkező, piaci- és éttermi hulladékok), szennyvíziszap és energianövények (kukorica, cirok, fű, cukorrépa és gabonafélék). Az ezekre jellemző gázhozamokat tartalmazza az 1. táblázat. Habár a fás szárú növények is nagy tömegben előforduló biomassza, azok magas lignin-tartalma alkalmatlanná teszi azokat a hagyományos rendszerekben történő felhasználásra. Az alapanyag zsírokból, fehérjékből, szénhidrátokból, cellulózból és hemicellulózból épül fel, melyek mind elengedhetetlenek a biogáz termeléshez. Amíg a szénhidrátok és fehérjék rövidebb idő alatt bomlanak le, a zsírok jóval magasabb biogáz hozamot biztosítanak. Ennek következtében a biogázban rejlő potenciál nagy mértékében függ az alap- és adalékanyagoktól, valamint az előállítás folyamán alkalmazott feltételektől [10]. Az egyik fontos technológiai tényező a nedvességtartalom. A nedvesebb anyagok könnyebben felhasználhatóak, ilyenek a trágya,

ételmaradék vagy zsírok. Az 5-15% szárazanyag tartalom az optimális, ettől kisebb értéknél igaz lejátszódik még a folyamat, viszont túl nagy mennyiségű felesleges víz folyik át a berendezésen, ami a gazdaságosság rovására megy, 15%-os szárazanyag tartalom felett az alapanyag már nem pumpálható és keverhető [18].

1. táblázat
Különböző szerves anyagok várható gázhozama szárazanyagra vonatkoztatva [9], [10]

Alapanyag	Gázhozam [cm^3/g sz.a.]
Sertéstrágya	340-550
Tehéntrágya	90-310
Baromfitrágya	310-620
Lótrágya	200-300
Birkatrágya	90-310
Búzaszalma	200-300
Árpaszalma	250-300
Kukoricaszalma	380-460
Fű	280-550
Nád	170
Zöldségmaradékok	330-360
Mezőgazdasági hulladékok	310-430
Növényi magvak	620
Vízijácintok	375
Algák	420-500
Szennyvíziszap	310-740

2.4. A trágya, mint alapanyag

Az állattartás többek között emberi fogyasztásra élelmiszereket, növényeink számára pedig szerves trágyát biztosít. Ez utóbbi a fontos tápanyagok mellett üvegházhatású gázoknak is forrása, alkalmazása kiemelt óvatosságot igényel. Az ebből származó metán és nitrogén-oxid kibocsátást számos faktor befolyásolja, mint a trágya kezelésének módja, a hőmérséklet, a termőföld típusa, valamint az állatok tápláléka. Továbbá a trágya nedves vagy vízfolyás közeli termőföldön való alkalmazása a nitrátok vízbe történő bemosását okozhatja, rontva ezzel a víz minőségét [5].

A trágya begyűjtése és anaerob rothasztása jelentősen lecsökkenti az abból származó üvegházhatású gáz-kibocsátást, csökkenti a trágyából származó szaghatásokat, felhasználható energiát biztosít, valamint a rothasztást követően tápanyagban gazdag komposzt-anyag jön létre. Tapasztalatok alapján a trágya anaerob kezelése a tápanyagokat, mint a nitrogén, foszfor és kálium könnyebben elérhetővé teszi a növények számára, ezzel növelve a terméshozamot [5].

A sertés a világon a legnagyobb számban tenyésztett állat. 2022-ben a sertéspopuláció meghaladta a 780 millió példányt [19]. Ennek több mint fele, ~450 millió darab Kínában, ~142 millió darab Európában

és ~74 millió az Egyesült Államokban található [20]. Magyarországon az elmúlt két évtizedben látványos esés látható a sertéspopulációban. A 2000-es évek elején a 4,8-5,1 millió darabból, 2021 végére 44%-os csökkenést követően már csak 2,7 millió példányt számlált az állatállomány [21], viszont még így is jelentős potenciált rejt a biogáz alapanyagként történő hasznosítás, még hazánkban is.

A nagyüzemi állattartás során keletkező trágya mennyisége világszerte egyre nagyobb problémát okoz, hiszen ennek csak töredékét használják fel, a fennmaradó mennyiség elszállítása és elhelyezése azonban költséges. A biogáz előállítás a trágya ártalmatlanítása mellett gazdasági hasznot is hoz [22].

Átlagosan egy sertés egy napra jutó trágyatermelése 8 kg-ra [9] tehető, így a globálisan keletkező napi trágyatermelés:

$$8\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{db}} \times 7{,}8 \times 10^{8}\ \mathrm{db} = \mathbf{6{,}24 \times 10^{9}\ \frac{kg}{nap}}$$

A sertéstrágya hasznos szárazanyag tartalma a már korábban említett 15% körül mozog, így a biogázelőállításra alkalmas trágya tömege:

$$6{,}24 \times 10^{9}\ \mathrm{kg} \times 0{,}15 = \mathbf{9{,}36 \times 10^{8}\ \frac{kg}{nap}}$$

Az 1. táblázat adatai alapján 1 kg szárazanyagra vonatkoztatva sertéstrágyából átlagosan 445 L/kg biogáz állítható elő. Így a napi potenciálisan előállítható biogáz mennyisége:

$$9{,}36 \times 10^{8}\ \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{nap}} \times 445 \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{kg}} = \mathbf{4{,}17 \times 10^{11} \frac{L}{nap}}$$

Ebből az éves termelés:

$$4{,}17 \times 10^{11} \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{nap}} \times 365\ \mathrm{nap} = 1{,}52 \times 10^{14} \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{év}} = \mathbf{1{,}52 \times 10^{11}\ \frac{m^3}{év}}$$

A sertéstrágyából előállított biogáz metántartalma 65-70% [10], így az éves biogáztermelésből az éves biometántermelés mennyisége:

$$1{,}52 \times 10^{11}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{év}} \times 0{,}65 = \mathbf{9{,}88 \times 10^{10}\ \frac{m^3}{év}}$$

Ezzel szemben a globális földgázfogyasztás $4{,}04 \times 10^{12}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{év}}$ [23], melyből a csak sertéstrágyából előállított biometán mennyiséggel kiváltható:

$$\frac{9{,}88 \times 10^{10}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{év}}}{4{,}04 \times 10^{12}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{év}}} \times 100 = \mathbf{2{,}45}\ \%$$

Ezen egyszerű számítás alapján látható, hogy az állattartás esetén már csak a sertéstrágya ilyen irányú hasznosításával is világviszonylatban számottevő földgázt lehetne megspórolni.

2.5. Közös fermentáció

Az iparilag fejlettebb országokban a biogáztermelést főként a szilárd és folyékony kommunális és ipari szerves hulladékok kezelésére alkalmazzák. A hulladékok kezelését pedig el kell végezni és az így keletkező biogáz egyre növekvő jelentőséggel bír. Ennek hatására megjelentek a biogáz hozam növelését elősegítő tényezők kutatása [9].

A közös fermentáció (kofermentáció) legalább két különböző anyag keverékének anaerob bontását jelenti [24]. Szerves anyagok közös fermentációját vizsgáló kísérletek eredményeit tartalmazza a 2. táblázat. Ezen kísérletek során egyidejűleg mindig többféle keveréket vizsgáltak, a táblázatban azonban ezek közül csak a legjobb eredményeket tűntettem fel. A szakirodalomban a gázhozamot legtöbbször 1 g vagy 1 kg száraz anyagra, vagy illékony száraz anyagra viszonyítják, melynek oka, hogy a különböző kísérletek során különböző szempontok szerint vizsgálták a keletkező biogázt, így nem került mindig minden paraméter meghatározásra. A 2. táblázatban sertéstrágyát is tartalmazó fermentációs kísérleti eredmények tekinthetők meg, a sertéstrágyához viszonyítva a keverékek esetében a gázhozam 3-176%-kal, a metántermelés 28-296%-kal emelhető meg, így megállapítható, hogy a bemutatott anyagkeverékek esetén szinte minden estben voltak olyan arányok, amik előnyösen befolyásolták a fermentációt.

A közös fermentációt ajánlott laboratóriumi kísérletekkel előkészíteni, kis méretben kipróbálni, hiszen az alapanyaghoz hasonlóan, az adalékanyag forrása és összetétele is változó, továbbá a reaktorban a biológiai folyamat könnyen felborulhat, ha túl hirtelen adagolunk be könnyen bomló anyagokat. Ezek mellett csak olyan adalékok alkalmazhatók, melyeknek az erjesztést követően bomlástermékei nem korlátozzák a kezelt anyag elhelyezhetőségét, azaz nem veszélyeztetik a mezőgazdasági területeket [9]. Közös fermentációval optimalizálható a pH és a C/N arány, elérhető nagyobb pufferkapacitás, valamint a mérgező vegyületek hígulása, mely magasabb gázhozamot eredményez [25].

2. táblázat
Kísérletek a különböző szervesanyagok közös fermentációjára

Forrás	A közös fermentáció alapanyagai	Alapanyag gázhozama	Alapanyag metántermelése	Gázhozam közös fermentáció esetén	Metántermelés közös fermentáció esetén
[26]	Sertéstrágya + konyhai hulladék	-	248,14 [cm^3/g sz.a.]	-	409,46 [cm^3/g sz.a.] **(+65%)**
[27]	Sertéstrágya + kender	129,6 [cm^3/g sz.a.]	78,4 [cm^3/g sz.a.]	183,9 [cm^3/g sz.a.] **(+42%)**	100,9 [cm^3/g sz.a.] **(+29%)**

Forrás	A közös fermentáció alapanyagai	Alapanyag gázhozama	Alapanyag metántermelése	Gázhozam közös fermentáció esetén	Metántermelés közös fermentáció esetén
[28]	Sertéstrágya + kukoricaszár	-	213 [cm^3/g illékony sz. a.]	-	272 [cm^3/g illékony sz. a.] **(+28%)**
[29]	Sertéstrágya + lótrágya	-	86,9 [cm^3/g illékony sz. a.]	-	258 [cm^3/g illékony sz. a.] **(+197%)**
[24]	Sertéstrágya + borászati szennyvíz	-	27 [cm^3/g TCOD]	-	107 [cm^3/g TCOD] **(+296%)**
[30]	Sertéstrágya + burgonyahéj	328 [cm^3/g illékony sz. a.]	-	380 [cm^3/g illékony sz. a.] **(+15%)**	-
	Sertéstrágya + glicerin	96 [cm^3/g TCOD]	-	215 [cm^3/g TCOD] **(+114%)**	-
	Sertéstrágya + alma-hulladék	268 [cm^3/g TCOD]	-	276 [cm^3/g TCOD] **(+3%)**	-
	Sertéstrágya + tápióka pép	362 [cm^3/g illékony sz. a.]	-	391 [cm^3/g illékony sz. a.] **(+8%)**	-
	Sertés trágya + fű szilázs	280 [cm^3/g illékony sz. a.]	-	304 [cm^3/g illékony sz. a.] **(+9%)**	-
[31]	Sertéstrágya + nyers glicerin	170 [cm^3/g illékony sz. a.]	-	470 [cm^3/g illékony sz. a.] **(+176%)**	-
[32]	Sertéstrágya + sertés hígtrágya	-	65,94 [cm^3/g illékony sz. a.]	-	132,59 [cm^3/g illékony sz. a.] **(+101%)**
[33]	Sertéstrágya + használt sütőolaj	-	333 [cm^3/g illékony sz. a.]	-	811 [cm^3/g illékony sz. a.] **(+244%)**

2.6. A vízinövények szerepe

Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2018/2001 irányelve a megújuló energiaforrásokból előállított energia használatának előremozdítását szorgalmazza. Eszerint támogatni kell azon bioüzemanyagok és biogázok előállítását, melyek alapanyagainak előállítása nem igényel további földterületet [34]. Ennek megfelelően kerestem a sertéstrágyát kiegészítő alapanyagot. Választásom a vízi növényekre esett, mivel ezek termesztése és betakarítása nem foglal el értékes termőföldeket.

Vízi növények biogázgyártásban történő felhasználásának eredményeit mutatja be a 3. táblázat. Az itt szereplő kísérletekre is igaz, hogy többféle keveréket vizsgáltak, amelyek közül csak a legeredményesebbeket tűntettem fel. Látható, hogy a vízi növények fermentációja már önmagában is

eredményes lehet, 270-540 cm^3 CH_4/g illékony szerves anyag közé tehető a biometán termelésük. Közös fermentáció esetében a gázhozam 100-580 cm^3/g sz.a., míg a metánhozam 110-350 cm^3 CH_4/g illékony sz. a. intervallumokba estek. Ezekből az eredményekből viszont látszik, hogy nem minden esetben van pozitív hatása az alapanyagok keverésének. Emiatt első körben mindenképp laboratóriumi kísérletek szükségesek ahhoz, hogy megállapítsuk, az adott növény alkalmas lehet-e a közös fermentációra, adagolása eredményezhet-e nagyobb gáz-, vagy metánhozamot, vagy gátolja a folyamatokat.

3. táblázat
Vízi növényeket tartalmazó kísérletek gáz- és metánhozama

Forrás	Alapanyag(ok)	Gázhozam szerves anyagra, vagy illékony szerves anyagra vonatkoztatva	Metánhozam szerves anyagra, vagy illékony szerves anyagra vonatkoztatva
[35]	Scenedesmus, Dictyosphareium, Keratococcus, Oscillatoria, Monoraphidium, Nitzchia	-	432,7 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]
	Chlorella sorokiniana		388 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]
	Chlorella sorokiniana		298 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]
	Scenedesmus residues		272,8 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]
	Chlamydomonas reinhardtii		462 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]
	Hydrodictyon reticulatum		537,5 [cm^3/g illékony sz. a.]
[25]	Miscanthus giganteus + mikroalga biomassza	573,83 [cm^3/g sz.a.]	347,86 [cm^3 CH_4/g sz.a.]
[36]	Ludwigia peploides + tehéntrágya	122,09 [cm^3/g sz.a.]	-
	Ludwigia peploides + sertéstrágya	101,54 [cm^3/g sz.a.]	
[37]	Acorus calamus linn + oltóanyag	454,1 [cm^3/g sz.a.]	
	Typha orienatalis + oltóanyag	476,6 [cm^3/g sz.a.]	
	Pontederia cordata + oltóanyag	399,7 [cm^3/g sz.a.]	
	Canna indica + oltóanyag	453,9 [cm^3/g sz.a.]	
	Colocasia tonoimo Nakai + oltóanyag	540,7 [cm^3/g sz.a.]	
	Thalia dealbata + oltóanyag	527,8 [cm^3/g sz.a.]	
	Hydrocotyle vulgaris + oltóanyag	459,4 [cm^3/g sz.a.]	
[35]	Lemnoideae + marhatrágya	580 [cm^3/g sz.a.]	
	Elodea nuttalli + anaerob iszap	-	299 [cm^3 CH_4/g sz.a.]
	Egeria densa + anaerob iszap		234 [cm^3 CH_4/g sz.a.]
	Potamogeton malaianu + anaerob iszap		156 [cm^3 CH_4/g sz.a.]
[38]	Microalgae chlorella + sertéstrágya	476 [cm^3/g illékony sz. a.]	348 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]
[35]	Ipomoea aquatica, Eichhornia crassipes + tehén hígtrágya	290 [cm^3/g illékony sz. a.]	-

Forrás	Alapanyag(ok)	Gázhozam szerves anyagra, vagy illékony szerves anyagra vonatkoztatva	Metánhozam szerves anyagra, vagy illékony szerves anyagra vonatkoztatva
[35]	Typha latifolia + anaerob iszap	-	151 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]
	Eichhornia crassipes + szennyvíziszap		140 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]
	Eichhornia crassipes + iszap		170 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]
	Cabomba + szennyvíziszap		109 [cm^3 CH_4/g illékony sz. a.]

Léteznek olyan vízinövények, melyek a számukra kedvező körülmények között nagyon gyorsan elszaporodnak, ezzel veszélyeztetve a vizek élővilágát. Ezeket a fajokat inváziós/invazív vízi növényeknek nevezik. Túlszaporodásuk károsítja az ökoszisztémát és rontja a vízminőséget, ezen felül kiirtásuk költséges. Az inváziós vízinövények vastag rétegben ellepik a vízfelszínt, elzárva a napfényt az többi előlény elől. Ez rossz hatással van a vizek állatvilágára, hiszen napfény hiányában elpusztulnak a számukra táplálékként szolgáló növények. A képződő vastag növényréteg továbbá komoly problémát jelent az emberek számára is: a víz alkalmatlanná válik úszásra, horgászatra és hajózásra is. Tekintve, hogy vízben élnek, az inváziós növények irtása bonyolult, így az elterjedésük megelőzése a prioritás [39].

Az egyik leggyorsabban szaporodó inváziós vízinövény a közönséges vízijácint, amely a víz felszíni és az alatti növényekre is veszélyt jelent. Pusztulásuk során továbbá felhasználják a víz oldott oxigéntartalmát, lesüllyednek a vízmeder aljára és rothadásnak indulnak. Ezzel másodlagosan is szennyezve a vizeket, csökkentve annak minőségét, amely akár az emberi egészségre is negatív hatással lehet. Mivel a vízijácint 95%-a víz, növeli a párolgási sebességet is, kiszárítva ezzel akár egész tavakat is [40]. A legnagyobb veszélyben a 3. ábrán látható Viktória-tó volt, amelynek megtisztítása évekig tartott [41]. A vizekből eltávolított inváziós fajok kezelése és tárolása is körülményes, lerakásuk jelentős CO_2 és CH_4 kibocsátással jár. Erre kínál megoldást a biogáztermelés.

3. ábra
A közönséges vízijácint által ellepett Viktória-tó *[41]*

Kísérleteimhez olyan könnyen szaporodó növényeket választottam, melyeknek Magyarországon is lehet jelentősége. A következőkben ezen növények fontosabb tulajdonságainak bemutatása olvasható.

2.6.1. Úszó kagylótutaj

Az úszó kagylótutaj (Pistia stratiotes) Dél-Amerikában őshonos, de napjainkban már megtalálható a világ legtöbb trópusi- és szubtrópusi területén. A folyamatos vegetatív szaporodásának köszönhetően tartozik az invazív fajok közé. Édesvizek felszínén úszó növény, amelynek gyökérzete 10-20 cm mélyen található a vízfelszín alatt. Levelei tőlevélrózsát alkotnak a vízfelszínen, átmérőjük 5-20 cm közé tehető. A 22-30 °C közötti, közepes keménységű (5-20 KH) és enyhén savas (6,5-7,2 pH-jú) vizekben fejlődik a legnagyobb ütemben. Az álló, vagy lassan folyó vizeket kedveli: tavakban, holtágakban és csatornákban a leggyakoribb. Alacsony a fagytűrő képessége, a hideg teleket nehezen viseli át, amely meggátolja a következő évi fertőzés, és egyben a túlzott elszaporodás lehetőségét is [42].

Az úszó kagylótutaj számos gyógyászati célra használható fel: ismert a fertőtlenítő és fájdalomcsillapító hatásuk, emellett vérhas és tuberkolózis (TBC) gyógyítására is alkalmazzák. A növény keserű, csípős ízű és hűsítő, hashajtó hatású, amely lázat és a vér betegségeit enyhíti. A levelek továbbá az ekcéma, fekély, lepra, aranyér és szifilisz hatékony ellenszereként alkalmazhatók. A néphagyományokban a levelekből készült főzetet hólyagpanaszok, vízkór, vesepanaszok, hematuria és vérszegénység esetén fogyasztották [43].

A vízfelületen sűrű, kb. 30 cm-es réteget hoz létre, amely a víz útjának elzárását és a vízszint megemelkedésével áradást okozhat, továbbá csökkenti a vízi gerinctelenek és a hínárközösség diverzitását. Túlszaporodása esetén a sűrű gyökérzet gátolja a víz rekreációs és mezőgazdagi célú felhasználását. Kiváló búvóhelyet biztosít a szúnyogok és lárváik számára, melyek a filariális paraziták

hordozói lehetnek. Előidézheti továbbá a vízminőség romlását, a halállomány pusztulását, valamint tavak és vízfolyások feliszaposodását [42], [43].

Az úszó kagylótutaj biogáz gyártásban történő alkalmazásának eredményességét számos tanulmány igazolja. Közös fermentációja oltóanyaggal 62,2 %-os [44] és 66,35%-os [45], szarvasmarha trágyával 63%-os [46], tehéntrágyával 68%-os [47], míg szennyvíziszappal 72,5%-os [48] maximális metántartalmat hozott.

2.6.2. Széleslevelű gyékény

A széleslevelű gyékény (Typha latifolia) megtalálható Észak-Amerika, Ázsia és Európa legtöbb hőmérsékleti övében, és sok szubtrópusi területen. Kedvelt élőhelyei a mocsarak, lápok, tópartok, tengerparti torkolatok vagy akár rizsföldek. Számára a magas szervesanyag tartalmú talaj a legkedvezőbb, só- és pH tűrése korlátozott. A megfelelő körülmények között gyors növekedés jellemzi, képes akár monospecifikus állományok kialakítására is. Gyöktörzzsel rendelkezik, az egyenes, el nem ágazó szára 150-300 cm-re is megnőhet. Tőállású, szürkészöld levelei 10-20 mm szélesek, hosszuk elérheti akár a 3 m-t is [49].

A növény különböző részeinek számos felhasználási területe létezik a múltban és jelenben egyaránt. Kedvelt alapanyaga volt a szövésnek, tetőfedésnek, rostjaiból műselymet és nyers, zöldesbarna papírszerű anyagot készítettek. A virágát párnák tömésére, szigetelésre, sebkötözésre, míg virágporát tűzijáték készítésre használták. A gyékény alkotta sűrű állományok búvóhelyet és élelmet egyaránt jelentenek az vadállomány és vízi madarak számára. A növény számos része alkalmas emberi fogyasztásra. A levelek és szárak és gyöktörzs táplálékként szolgált, utóbbit kiszárítva lisztté is őrölték. Túlzott elszaporodása esetén a gyöktörzsek egy vastag réteget képeznek, a vízfelszín közelében, amely annak tápanyagtartamának és a vadállomány diverzitásának befolyásolását eredményezi. Előhelyén megnehezíti a túlélést a többi növény számára, és korlátozza az újabb növények kifejlődésének lehetőségét [49], [50].

Néhány esetben már kísérleteztek a széleslevelű gyékény közös fermentációjával, melyek mindig felülmúlták az alapanyag egyedüli fermentációjakor elért eredményeket. Ez a gázhozam emelkedésében, a szerves anyagok könnyebb lebontásában, a tápanyaghoz való hozzáférés növekedésében, és a megemelkedett ph pufferkapacitásban mutatkozik meg a leginkább [51]. Közös fermentációja kukorica szilázzsal 686 cm^3/g illékony sz. a. [52] gázhozamot, oltóanyaggal átlagosan 214 ± 28 cm^3 CH_4/g illékony sz. a. [51] metántartalmat eredményezett.

2.6.3. Vízi rucaöröm

A vízi rucaöröm (Salvinia natans) Kelet-Európában és Ázsiában őshonos. Azon fajok közé tartozik, melyek globális egyedszámát folyamatos ingadozás jellemzi, az elmúlt évek azonban fokozatos csökkenő tendenciát hoztak. Európa számos országában kihalt vagy veszélyeztetett faj, hazánkban védett [53]. Egyedszámának csökkenését túlnyomórészt az élőhelyük környezetét negatívan befolyásoló antropogén hatások okozzák. Tovább nehezíti helyzetüket, hogy ismeretlen a vizek számukra optimális fizikai- és kémiai összetétele [54].

A vízi rucaöröm egy vízfelszínen szabadon úszó páfrány, így nem rendelkezik gyökérzettel. Nagy számban képes elszaporodni álló- vagy lassan folyó édesvizekben, mint az árkok, csatornák, tavak és holtágak [53], [54].

Ezt a fajt eddig nem alkalmazták a biogázgyártásban, a fito- és bioremediációs felhasználása viszont annál jelentősebb [55]–[57].

2.6.4. Közönséges valiznéria

A Vallisneria spiralis, azaz közönséges valiznéria Dél-Európában, Észak-Afrikában, a Közép-Keleten és Délnyugat-Ázsiában őshonos édesvizekben élő növény. Az előző évszázadban jelentősen elterjedt Európa egyéb részein is, különösen a mesterségesen fűtött vizekben. Ez az ivartalan és gyors szaporodásának köszönhető, mára már inváziós növényként tartják számon. Alámerült, gyökerező, évelő vízinövény, amely álló- és folyóvizekben egyaránt megtalálható. Gyökerei rostosak, az iszapban vízszintesen helyezkednek el. A víz alatt található szalagszerű levelek a gyöktrözsből hajtanak ki, melyek 10 mm szélesek, hosszuk elérheti a 100 cm-t is. Jól tolerálja a vizek alacsony sótartalmát, 6-9 pH-jú 15-30 °C-os vízben képes megélni, 25°C-on erős közvetlen megvilágítás hatására fejlődik a leggyorsabban [42], [58]. Növeli a víz oxigéntartalmát, emellett képes a vízben lévő káros anyagok (pl.: króm) egy részének megkötésére. Henger alakú termése és levelei táplálékként szolgálnak vízimadarak és egyes halfajok számára. A közönséges valiznéria a többi inváziós fajhoz képest lassabban képes kiszorítani más vízinövényeket. Kedvező életfeltételek esetén leveleivel képes az egész víztestet elfoglalni, amely egyaránt veszélyt jelent a növények és halak számára. A hosszú és sűrű levelei számos kártékony hatást okoznak: csökkentik a víz áramlási sebességét, növelik az áradás veszélyét, feliszaposodást okoznak, valamint ellehetetlenítik a hajózást, horgászatot és úszást [42].

Birkatrágyához adva 67-73%-os maximális metántartalom mellett 21%-kal növelte a trágya egyedüli fermentációjának gázhozamát [59]. Továbbá ipari szennyvízzel alkotott keverékének anaerob bontása alacsony, 29,9 cm^3/g sz.a. átlagos gázhozamot eredményezett [60].

3. A kísérlet

A kísérleteimhez alapanyagként sertéstrágyát, vízi növényeket és oltóanyagot használtam. A sertéstrágya egy sertéstelepről, az oltóanyag egy élelmiszerhulladékokat feldolgozó üzemből, míg a vízi növények egy része a Miskolci Egyetem területén található tóból származik, a másik részét pedig akvarisztikai szaküzletben vásároltam. A növényeket kiszárítva, apróra őrölve készítettem elő, majd különböző arányban adtam hozzá a trágyához és oltóanyaghoz.

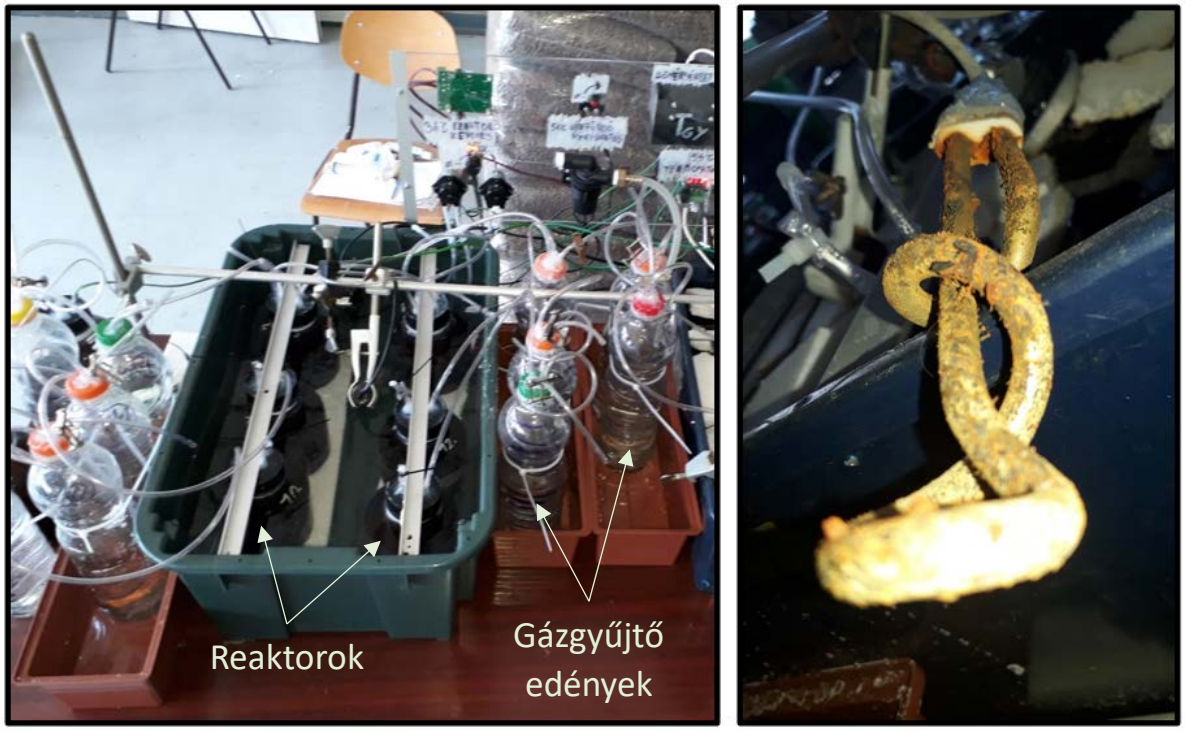
A 4. táblázatban található alapanyagokon és keverékeken végeztem fermentációs kísérleteket.

4. táblázat
A vizsgált összetételek

Jelölés	Magyarázat
TO	75% hígtrágya + 25% oltóanyag
T	100% hígtrágya
O	100% oltóanyag
K	90% oltóanyag + 10% kagylótutaj
10K	75% keverék (10% kagylótutaj + 90% trágya) + 25% oltóanyag
20K	75% keverék (20% kagylótutaj + 80% trágya) + 25% oltóanyag
Gy	90% oltóanyag + 10% gyékény
10Gy	75% keverék (10% gyékény + 90% trágya) + 25% oltóanyag
20Gy	75% keverék (20% gyékény + 80% trágya) + 25% oltóanyag
R	90% oltóanyag + 10% rucaöröm
10R	75% keverék (10% rucaöröm + 90% trágya) + 25% oltóanyag
20R	75% keverék (20% rucaöröm + 80% trágya) + 25% oltóanyag
V	90% oltóanyag + 10% valiznéria
10V	75% keverék (10% valiznéria + 90% trágya) + 25% oltóanyag
20V	75% keverék (20% valiznéria + 80% trágya) + 25% oltóanyag

3.1. A kísérleti rendszer fejlesztése

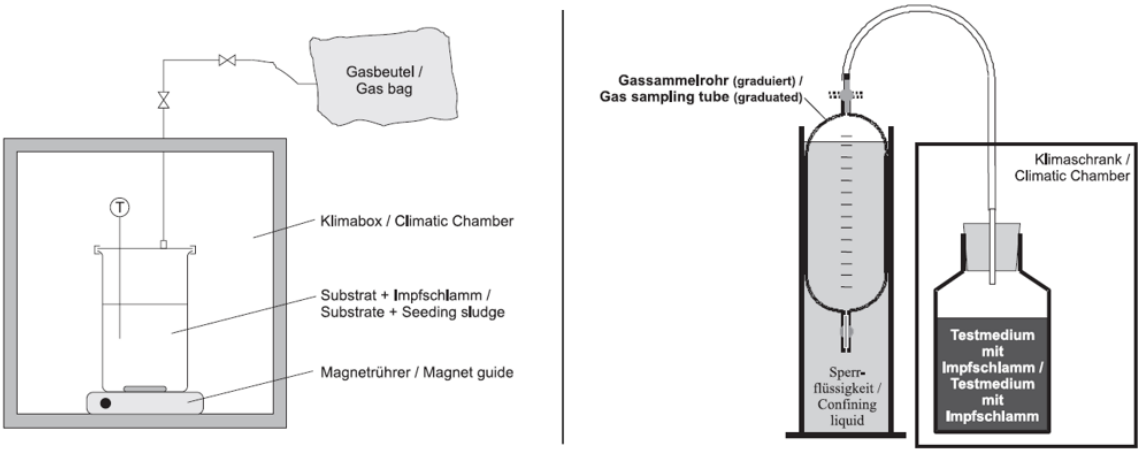
Az Energia- és Minőségügyi Intézetben évek óta folynak kísérletek biogáz előállítással kapcsolatban, amely a 4. ábrán látható kísérleti rendszerben valósult meg. A biogáz reaktorban képződő gáz gyűjtése és mennyiségének meghatározása egy sós vízzel töltött flakon segítségével történt. A sós vízre azért volt szükség, mert ebbe nem oldódik be a szén-dioxid, ami a biogáz egyik főkomponense, a gázmennyiséget pedig az edényből kiszorított víz alapján lehetett meghatározni. 1-2 naponta a kiszorított vizet vissza kellett tölteni a flakonba és újra lehetett gázt gyűjteni, gázmennyiséget meghatározni és elemezni. A rendszer legnagyobb hátránya a sós víz volt, ami rácsöpögve alkatrészekre tönkretette azokat, többek között a fűtést biztosító merülőforralót is (4. ábra).



4. ábra

A kísérleti rendszer eredeti kialakítása (balra) és a károsodott merülő forraló (jobbra)

A Fermentation of organic materials – VDI guideline 4630 szabvány a laboratóriumi biogáz előállítással kapcsolatban nyújt támaszt az alapanyag előkészítéstől az egyes gázparaméterek méréséig, minden tekintetben. Tartalmaz ajánlásokat a biogáz előállító rendszerekre is, ezekre látható pár példa az 5. ábrán.



5. ábra

Példa laboratóriumi fermentorokra a VDI 4630 [61] alapján

Munkám során első lépésben a biogáz előállító rendszert kellett fejleszteni, melyhez a VDI 4630 szabványt vettem alapul, viszont ez a rendszerek kialakítását csak hozzávetőlegesen mutatja be, ahogyan azt az 5. ábra is mutatja, így azt több lépésben kellett azt tökéletesíteni.

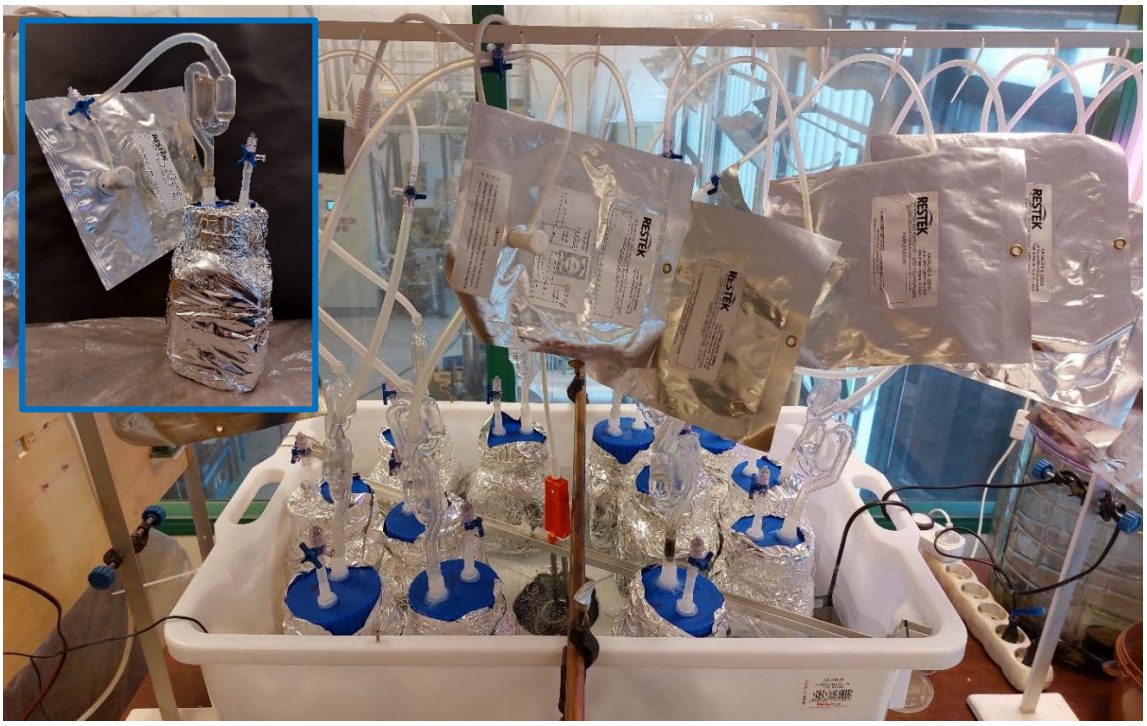
Reaktorként olcsón beszerezhető 0,7 l-es befőttesüveget használtam, a gáz gyűjtését és gázmennyiség mérést pedig vízkiszorítás helyett Restek gyártmányú gázgyűjtő zsákokkal valósítottam meg. A befőttesüvegek kupakjait két helyen kifúrtam, az egyik helyre egy háromjáratú elzáró csapot ragasztottam, a másik nyíláshoz csatlakozott egy vízzárként funkcionáló borászati kotyogó, ez mutatta a gázképződés intenzitását, a rendszer gáztömörségét, illetve indításkor az átöblítés után lezárta reaktort. A reaktorokat alufóliával tekertem körbe, ez megfelelő sötét környezetet biztosított a mikroorganizmusoknak. A befőttesüvegekkel összekötött zsákokból a gázt 50 ml-es gázfecskendővel távolítottam el, ezáltal minta biztosítható a gázelemzéshez, illetve meghatározható a gáz térfogata. Ezt a rendszert mutatja a 6. ábra. Az összeállított reaktorokat végül egy 35 ± 1 °C-os vizet tartalmazó kádba tettem, amelyben a megfelelő hőmérsékletet egy termosztát és egy vízmelegítő, a víz keverését egy akváriumi keringető szivattyú biztosította.

Ez a kialakítás sem volt teljesen megfelelő, ugyanis a befőttesüvegek kifúrt és megkarcolódott fém kupakja két kísérletsorozat 80-100 napja alatt jelentősen korrodálódott, továbbá a gázgyűjtő zsákok használatában is felfedeztem egy anomáliát. Egy sikertelen kísérletsorozat eredményeként kiderült, hogy a zsákok csapjai kialakításuk miatt csak teljesen nyitott és teljesen zárt állapotban biztosítják a gáztömörséget. A csak részben megnyitott csapok esetén a napi néhányszor tíz cm^3 gáztermelés jelentős része a zsákon kívülre távozott, így a csapokat szilikonnal kellett utólagosan tömíteni.

Egy következő kísérletsorozat esetén a nem megfelelő betöltött alapanyagmennyiség okozta a használhatatlan eredményeket. A kísérletsorozat tanulsága alapján a reaktorok optimális töltési mennyisége kb. 65-75%, ettől nagyobb mennyiségű alapanyag betöltése esetén a képződő gázbuborékok az alapanyagot kinyomták a vízzáron keresztül, így a folyékony alapanyag bejutott a vízzárba (6. ábra), majd onnan a gázgyűjtő zsákba is. Az optimálistól sokkal kisebb mennyiséget adagolva pedig a képződő gáz mennyisége olyan kicsi, hogy nehézzé válik a gázmennyiség meghatározása és a gázelemzés is.

6. ábra
A reaktor felépítése balra (1. – alufóliával takart reaktor; 2. – 1. csap; 3. – vízzár; 4. – 2. csap; 5 – gázgyűjtő zsák) és egy hibás kísérlet során a vízzárba jutott alapanyag jobbra

Több sikertelenül zárult kísérletsorozat alatt kialakult a rendszer végleges, jól használható formája (7. ábra), amelyben a befőttesüvegeket vastag műanyag kupakkal rendelkező laborüvegre cseréltem, a gázgyűjtő zsákokat megerősítettem szilikonnal, és optimalizáltam a töltési mennyiséget.



7. ábra
A kísérleti rendszer

3.2. Az alkalmazott berendezések bemutatása

Az alapanyag nedvességtartalmának meghatározását az „MSZ EN 14774:2010 - Szilárd bio-tüzelőanyagok. A nedvességtartalom meghatározása. Szárítószekrényes módszer.” című szabvány alapján egy Mettler Toledo HB43-S Halogen nedvességtartalom meghatározó berendezéssel végeztem el 105 °C-on tömegállandóságig történő szárítással.

A minták elemi összetételének (karbon, hidrogén, nitrogén, kén) meghatározása egy Carlo Erba EA1108 típusú elemanalizátorral történt az „MSZ EN 15104:2011 Szilárd bio-tüzelőanyagok. Az összes szén-, hidrogén- és nitrogéntartalom meghatározása. Műszeres módszer.” alapján.

A folyékony halmazállapotú anyagok pH-ját Apera PH910 típusú pH mérővel határoztam meg.

A bemutatott rendszerben a kísérletek 60 napig tartottak, biogáz képződését 1-2 naponta regisztráltam, ekkor vettem a gázelemzéshez szükséges 60 ml mennyiségű gázmintát is. A biogáz főkomponenseinek meghatározását COx modullal szerelt Agilent 490 MicroGC-vel végeztem. Ez alkalmas a metán, szén-dioxid, szén-monoxid, hidrogén és oxigén meghatározására. A gázelemző által meghatározható komponensek közül a szén-monoxid nincs jelen a biogázban, a többi komponens közül pedig a metán bír legnagyobb jelentőséggel.

A gáz kén-hidrogén és ammónia tartalmának meghatározását VentisPro5 elektrokémiai cellával rendelkező gázdetektorral végeztem.

4. Eredmények bemutatása

4.1. Alapanyag vizsgálatok eredményei

Az 5. táblázat tartalmazza az alapanyagok elemi összetételeit és pH-ját. Látható, hogy a gyékényt leszámítva, a trágya karbontartalmánál a növényeké jóval alacsonyabb, ami kevésbé előnyös biogáz előállítás szempontjából, viszont a kéntartalom a valiznérián kívül a többi növény esetén kisebb volt, mint a trágya kéntartalma. Ennek gáztisztítás során lehet jelentősége, ugyanis kisebb mennyiségű kénhidrogén képződésére lehet számítani, melynek eltávolítása kisebb költségekkel megvalósítható. A trágya pH-ja az optimális tartományban helyezkedik el, az oltóanyagé viszont ettől nagyobb értéket mutatott.

5. táblázat
Az alapanyagok elemi összetétele száraz állapotra viszonyítva, és a nedves anyagok pH-ja

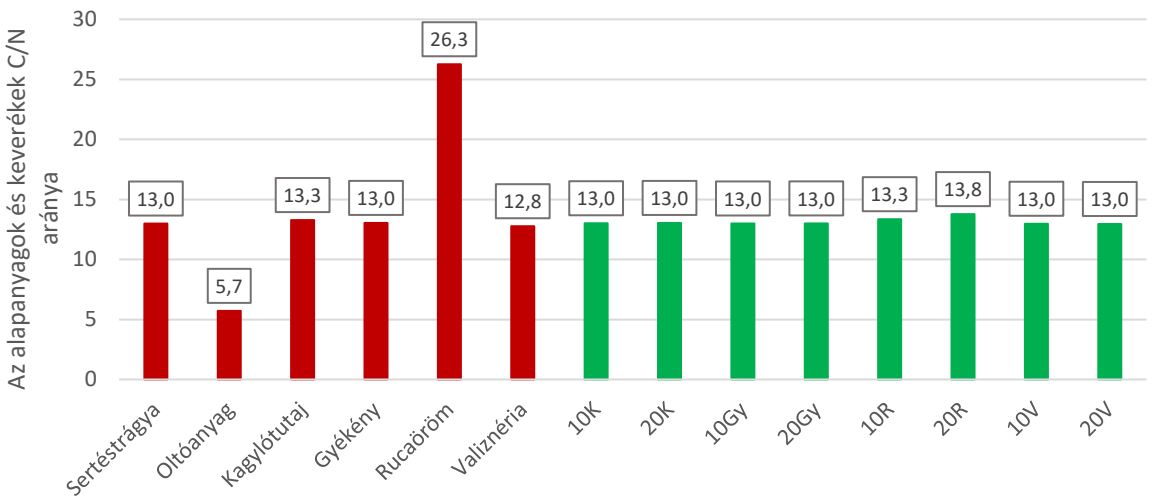
	Sertés-trágya	Oltóanyag	Kagylótutaj	Gyékény	Rucaöröm	Valiznéria
N [m/m%]	3,01	6,37	2,46	3,21	0,76	2,43
C [m/m%]	39,16	36,36	32,60	41,91	19,92	31,06
H [m/m%]	5,63	5,08	4,62	5,89	2,01	3,98
S [m/m%]	0,33	0,85	0,25	0,23	0,14	0,42
pH	6,9	8,53	-	-	-	-

A 6. táblázat a fermentációhoz előkészített keverékek elemi összetételét és pH-ját mutatja be. Mivel viszonylag kis mennyiségben kerültek beadagolásra a növények, számottevően nem csökkent a keverékek karbontartalma, a kéntartalom pedig elenyésző mértékben csökkent.

6. táblázat
A keverékek elemi összetétele száraz állapotra viszonyítva, és a nedves anyagok pH-ja

	10K	20K	10Gy	20Gy	10R	20R	10V	20V
N [m/m%]	2,96	2,90	3,03	3,05	2,79	2,56	2,96	2,90
C [m/m%]	38,50	37,85	39,43	39,71	37,23	35,31	38,35	37,54
H [m/m%]	5,53	5,43	5,66	5,68	5,27	4,91	5,47	5,30
S [m/m%]	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31	0,29	0,34	0,35
pH	7,25	7,28	7,24	7,25	7,21	7,23	7,22	7,24

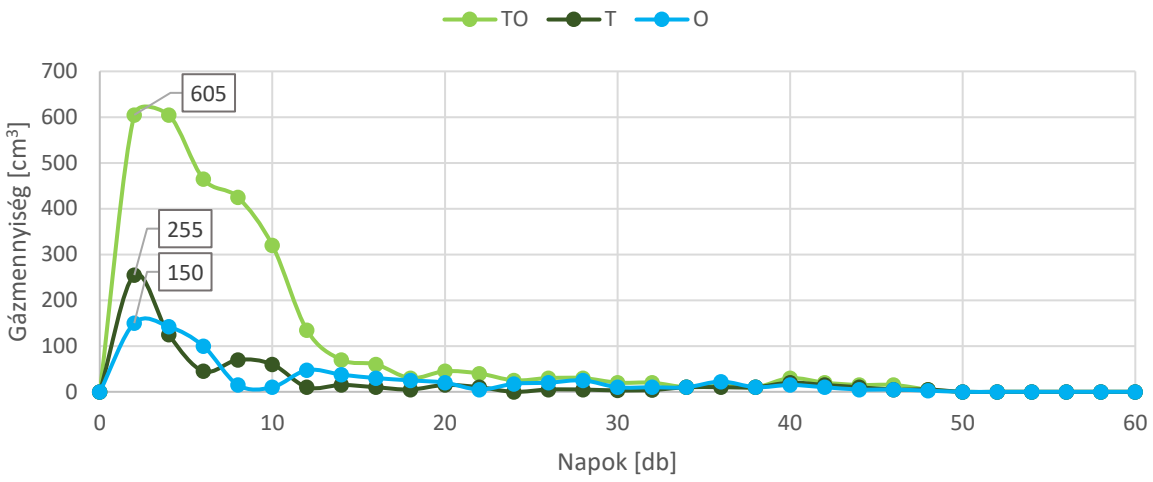
A biogáz előállítás szempontjából az egyik legfontosabb tényező az alapanyag C/N aránya, ez tekinthető meg a 7. ábrán az alapanyagok és keverékek esetén. Ahogy korábban már bemutattam, az optimális C/N arány 20-30 közötti, az ábra alapján ezt sem a trágya, sem a keverék nem érik el. Ez várhatóan a képződő gáz alacsonyabb metántartalmát okozza. Bár a rucaöröm 26,3-os C/N aránya önmagában ígéretes, mivel a trágya és oltóanyag mellett csak kis mennyiségben van jelen, ezek alacsony C/N arányát nem volt képes kompenzálni.



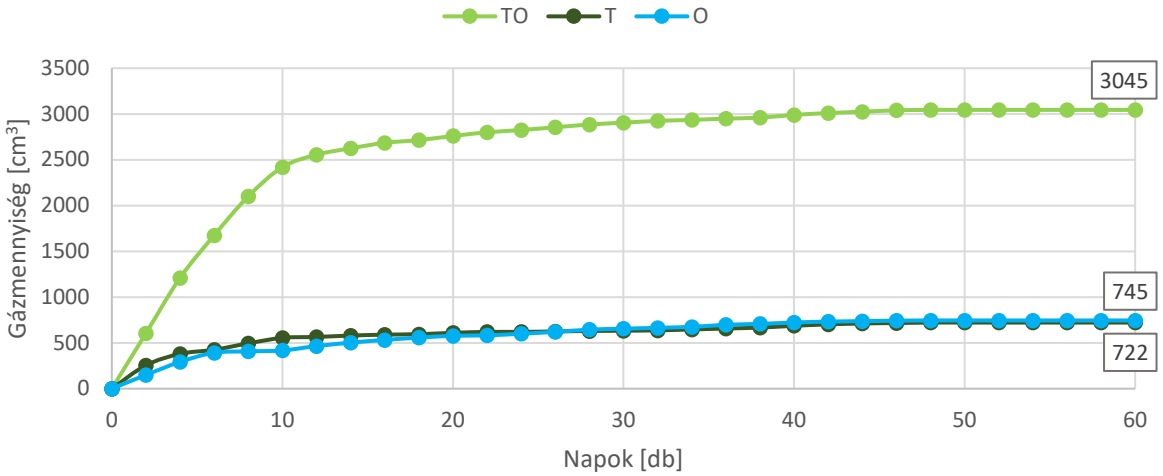
8. ábra
A vizsgált anyagok C/N aránya

4.2. Gázhozam vizsgálata

Alap kísérletként sertéstrágya fermentációját vizsgáltam, a napi gázhozam eredmények a 9. ábrán, a kumulatív gázhozam pedig a 10. ábrán tekinthető meg. A trágya, oltóanyag és 25% mennyiségű oltóanyagot tartalmazó trágya fermentációját összehasonlítva az oltóanyag eredményezte a legkisebb gázhozamot, amit a trágya gáztermelése követett. A működő biogáz reaktorból származó oltóanyag rendelkezett még bizonyos mennyiségű lebontható szerves anyaggal, de már lényegesen kisebb gáztermelést produkál, mind a reaktorba adagolt friss anyag. Ezzel szemben lebontó mikroorganizmusokban gazdag, ezért segíti a friss alapanyag lebontását. Ahogyan a 10. ábrán is látható, a trágya és az oltóanyag közel megegyező gázhozamot produkált, viszont az oltóanyaggal kevert trágya kumulált gázhozama számottevően, 422%-kal növekedett meg a trágya gáztermeléséhez hasonlítva, ezért a későbbi kísérletek során minden esetben alkalmaztam az oltóanyagot a keverékek összeállítása során. A napi gáztermelést megvizsgálva (9. ábra) látható, hogy a gáztermelés 3-4 napon belül elérte a maximumát, illetve a lebontási folyamat kb. két hét alatt szinte teljesen lezajlott.

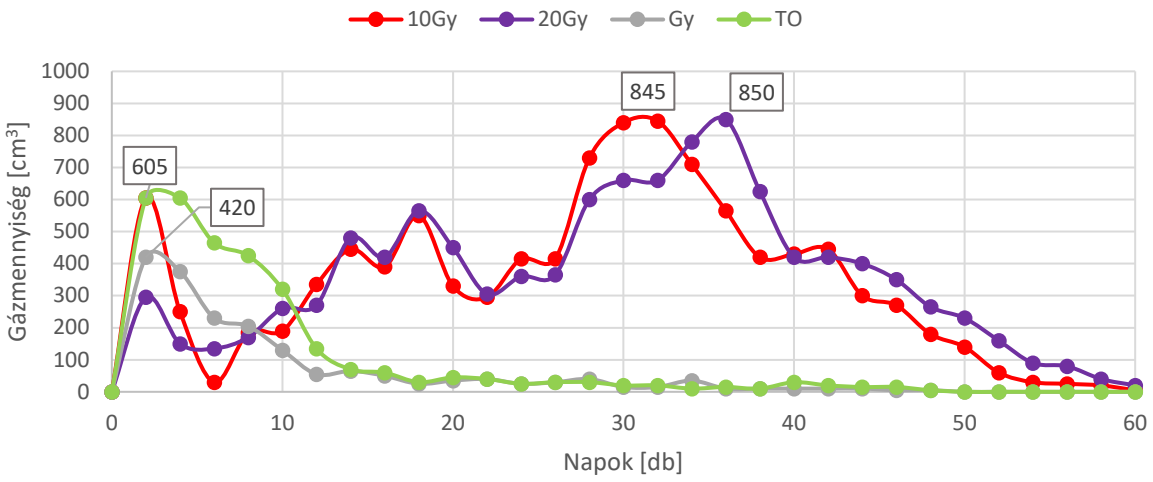


9. ábra
Sertéstrágyát és oltóanyagot tartalmazó keverékek napi gáztermelése

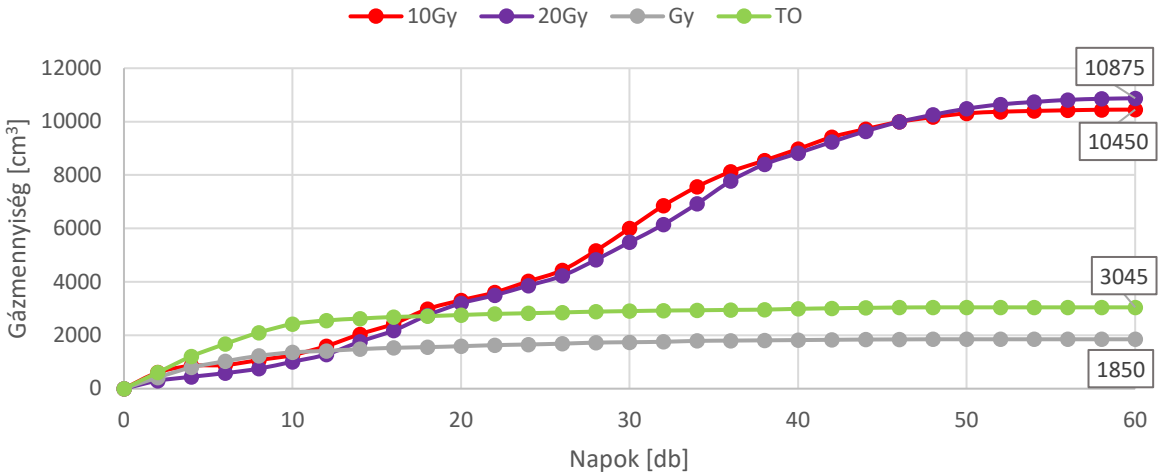


10. ábra
Sertéstrágyát és oltóanyagot tartalmazó keverékek kumulált gázhozama

A fermentáció tekintetében a kagylótutaj és a gyékény, illetve a valiznéria és rucaöröm mutatott hasonló eredményeket, ezért ezek közül egyet-egyet (széleslevelű gyékény és vízi rucaöröm) mutatok be. A 11. és 12. ábrák a széleslevelű gyékényt tartalmazó kísérletek napi gáztermelését és kumulatív gázhozamát mutatják be.



11. ábra
Gyékényt tartalmazó keverékek napi gáztermelése

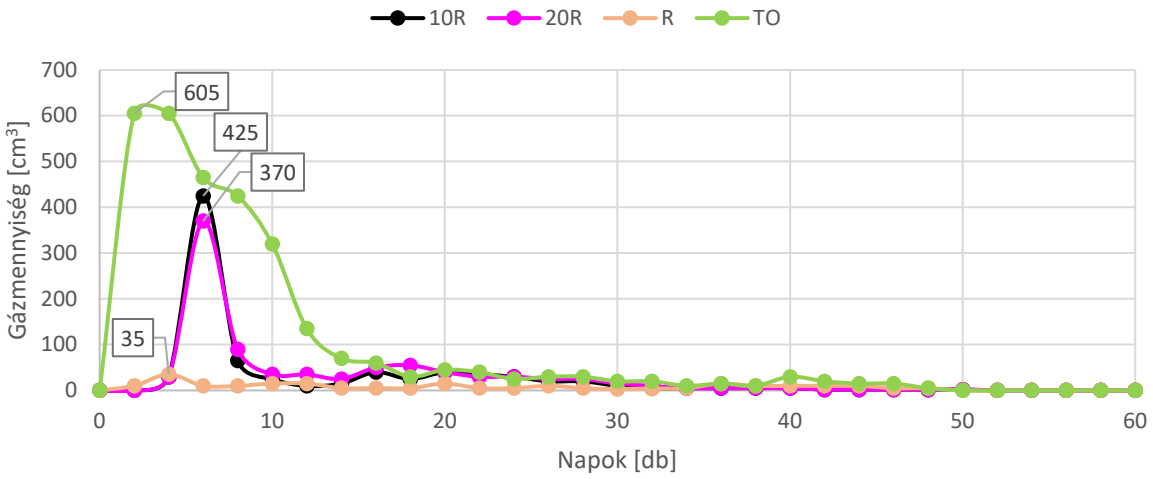


12. ábra
Gyékényt tartalmazó keverékek kumulált gázhozama

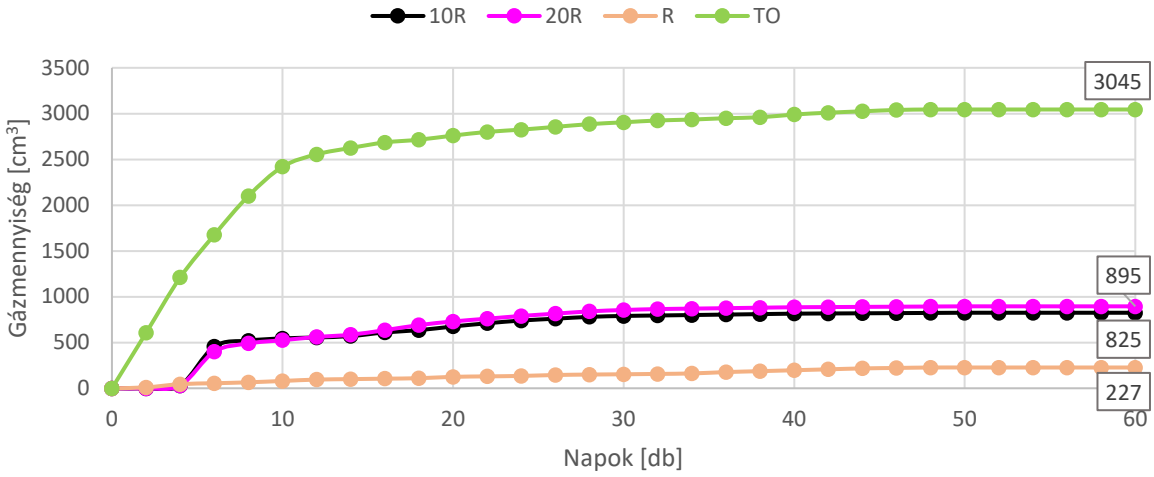
A 11. és 12. ábrák alapján a gyékény és trágya hasonló gázhozamot produkált, a lebomblás kinetikája is hasonló. A gyékényt tartalmazó keverékek esetén viszont sokkal hosszabb időn keresztül tartott a lebomlás, melynek során többszörös mennyiségű gáz képződött. A gáztermelés a maximumát 30-40 nap között érte el. A 12. ábra adatai alapján a gyékény által produkált kumulált gázhozam 39%-kal volt kisebb, mint a trágya által termelt gázmennyiség, a 10 és 20%-ot tartalmazó keverék 343%-os, és 357%-

os növekedést eredményezett a gázhozamban. Ezek nagyon ígéretes hozamnak tekinthetők, amelyek szinte megegyező számokat mutatnak a kagylótutajt tartalmazó keverékekkel.

A 13. és 14. ábrák a vízi rucaörömöt tartalmazó kísérletek napi gáztermelését és kumulatív gázhozamát mutatják be.



13. ábra
Vízi rucaörömöt tartalmazó keverékek napi gáztermelése



14. ábra
Vízi rucaörömöt tartalmazó keverékek kumulált gázhozama

Az 13. ábrán jól látható, hogy a rucaöröm esetében már nem beszélhetünk a korábbiakhoz hasonló eredményekről. A rucaöröm gáztermelése a sertéstrágyához képest sokkal kisebb mértékű volt, illetve a lebontási folyamat is sokkal hamarabb véget ért. A kumulált gázhozamok (14. ábra) esetén látható,

hogy a keverékek 71-73%-os csökkenést eredményeztek a trágyához viszonyítva, de a rucaöröm önmagában még ezt a hozamot sem közelítette meg.

A gázhozamokat minden összetétel esetén átszámoltam 1kg szárazanyag tartalomra a következő adatok felhasználásával:

- A 4. táblázatban szereplő keverék összetételek,
- Az oltóanyag mért szárazanyagtartalma: 5,1%,
- A trágya beállított szárazanyagtartalma: 15%,
- A beadagolt vízi növények szárazanyagtartalma: 100%.

A reaktorokba adagolt keverék szárazanyagtartalma a 10K jelű keverék esetén:

$$300\text{g} \times 0{,}15 + 75\text{g} \times 0{,}051 + 4{,}5\text{g} = 53{,}25\ \text{g}$$

A kumulált gázhozamot elosztva a reaktorba adagolt szárazanyagtartalommal megkapjuk a fajlagos gázhozamot:

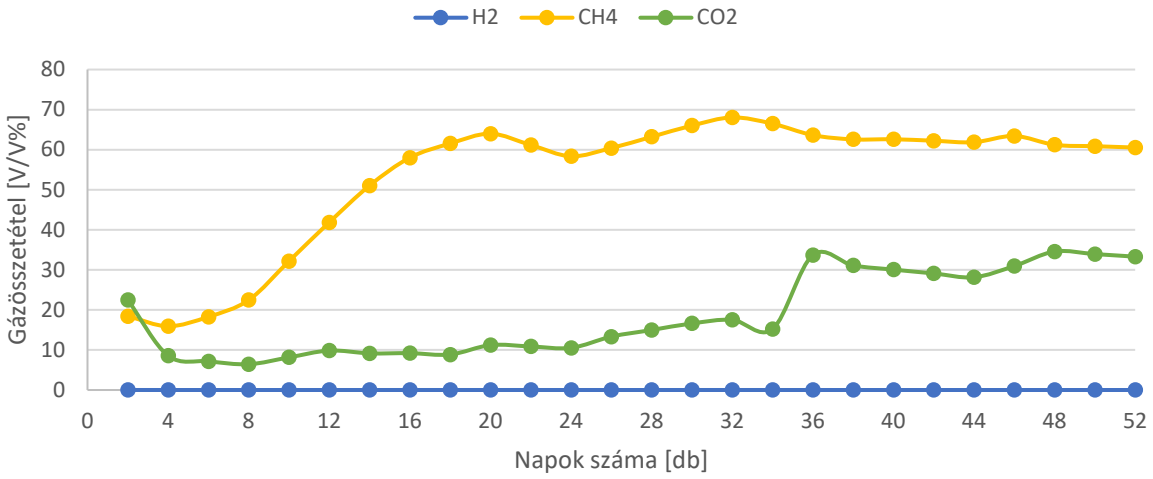
$$\frac{10380\ \text{cm}^3}{53{,}25\ \text{g}} = 194{,}93\ \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} = 194{,}93\ \frac{\text{L}}{\text{kg}}$$

Ezen számításokat minden összetétel esetén elvégeztem, és az eredmények a 15. ábrán tüntettem fel. Ezek alapján a kagylótutaj, gyékény és valiznéria önmagában nagyobb gáztermelést produkált, mint a sertéstrágya, a kagylótutaj és gyékény kis mennyiségű trágyához adagolásával viszont sokszoros gázhozam érhető el. Az is megfigyelhető, hogy a 10 és 20% hozzáadása között nem volt számottevő különbség a gáztermelésben, viszont a nagyobb hozzáadott mennyiség kisebb gázhozamot eredményezett mindkét növény esetén. A vízi rucaöröm gáztermelése sokkal kisebb volt, mint a trágyáé, a keverékekből köztes gázmennyiségek keletkeztek, viszont a valiznéria gátolta a gáztermelést, a keverékek fermentációjából származó biogáz mennyisége alulmaradt az önmagában fermentált tárágyához és valiznériához képest.

15. ábra
Az alapanyagok és a keverékek fajlagos gázhozamai

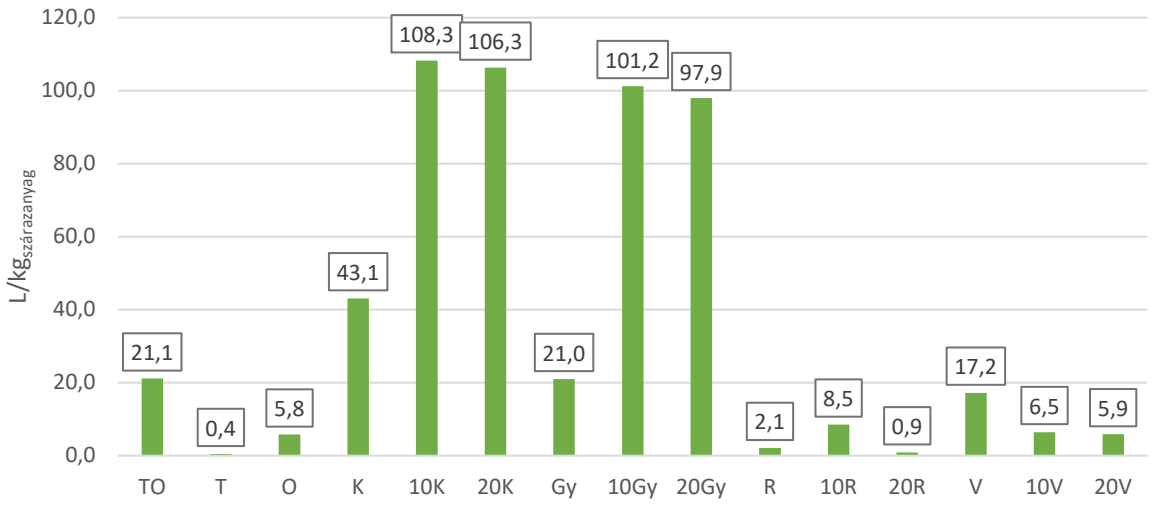
4.3. Gázösszetétel vizsgálata

A biogáz összetételének változását a 20% gyékényt tartalmazó keverékből származó gáz időbeli változásán keresztül mutatom be (16. ábra). Az első két hétben a szén-dioxid és metántartalom emelkedett, majd közel állandó értéken maradt a kísérlet végéig. A hidrogén mennyisége végig 0,1% alatti volt.



16. ábra
A biogáz főkomponenseinek változása a 20K jelű keverék fermentációja során

A biogáz legfontosabb komponense a metán, ennek kumulatív mennyiségének alakulása látható a 17. ábrán. Ez alapján szintén a kagylótutaj és a gyékény tartalmú keverékek rendelkeztek a legnagyobb hozammal, maguk mögé utasítva a többi keveréket és alapanyagot.

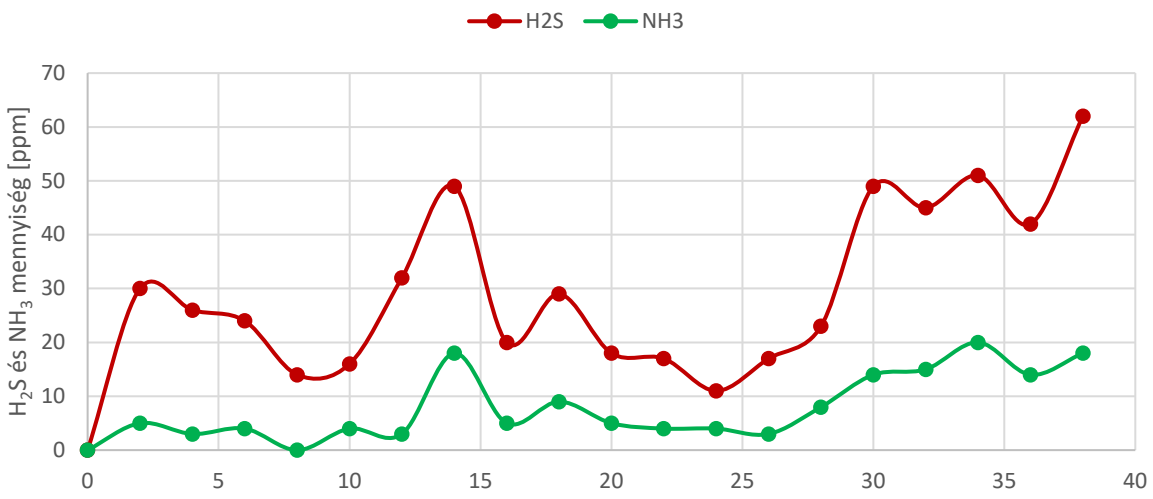


17. ábra
A különböző keverékekből származó fajlagos metántartalom

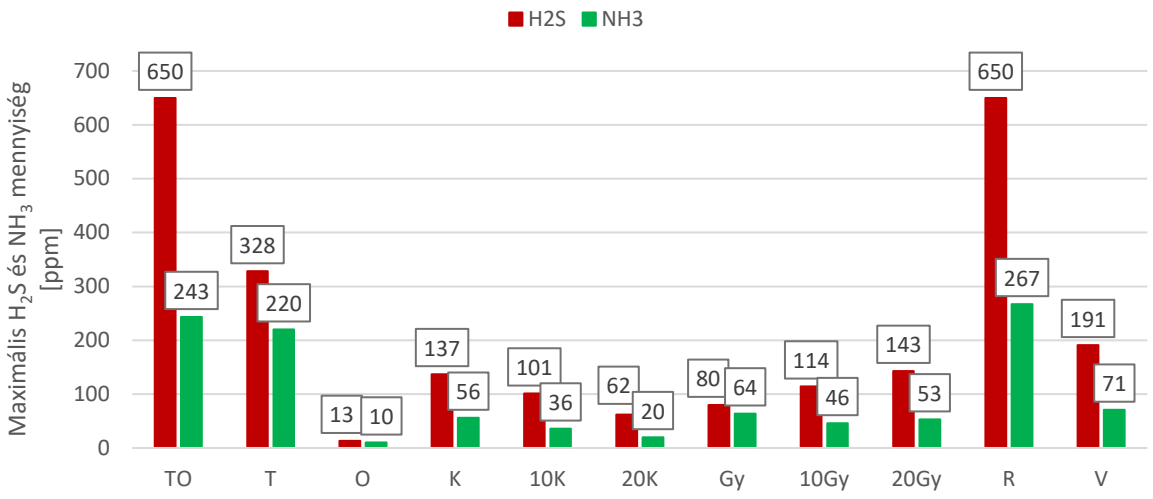
A gáz kén-hidrogén és ammóniatartalmának meghatározása és kontrollálása elengedhetetlen, hiszen negatív hatással lehetnek az anaerob bontási folyamatra, gázhozamra, stb [62]. A kén-hidrogén főleg a biogáz hasznosításának helyén ártalmas, eltávolításával csövek, turbinák és egyéb alkatrészek korróziója [63], valamint a gáz elégetésével járó SO_x vegyületek keletkezése előzhető meg [64]. Továbbá a biogázban lévő kén-hidrogénnel rossz szaghatás és toxicitás jár együtt, mely utóbbi a gáztermelést gátolja, akár teljesen le is állíthatja azt [62]. A magas koncentrációban (3-4 g/L) jelen lévő ammónia a szerves anyagok lebontásának akadályozásával lassítja a biogáz előállításának folyamatát [65], egyes tanulmányok 25%-kal alacsonyabb metánhozamról és késleltetett metántermelésről számolnak be. Továbbá a biogáz elégetésekor a magas ammónia koncentráció NO_x vegyületek keletkezésével jár, amely környezetvédelmi szempontból problémás [66].

A kénhidrogén és ammónia koncentráció alakulását egy választott keverék esetén a 18. ábra mutatja be. A kísérletekre jellemző volt, hogy ezek a komponensek a fermentáció első 20-30 napjában kisebb mennyiségben voltak jelen, majd a maximális értékek mindig a későbbi időszakban jelentek meg. Mivel a gáztermelés a kísérletek utolsó 20 napjában jelentősen lecsökkentek, sok esetben nem volt elegendő minta arra, hogy ezen komponenseket végig monitorozzam, ez jól látható a 18. ábrán is. Mivel a lebontási folyamat végéhez közeledve egyre nagyobb mennyiségben jelentek meg ezek a

komponensek, a 19. ábrán a maximális mennyiségeket tüntettem fel. Az oltóanyaggal kevert trágya esetén a kénhidrogén maximuma 650 ppm, az ammónia 243 pm volt, melyhez képest a növények ettől lényegesen kisebb mennyiségeket produkáltak. Gáz- és metánhozam tekintetében a kagylótutajt és gyékényt tartalmazó keverékek fermentációja volt a legeredményesebb, a vizsgált két gázszennyező esetén is pozitív hatás állapítható meg a két növényt tartalmazó keverék esetén, a kénhidrogén és ammónia mennyisége töredéke volt a tárgyából termelt biogázhoz hasonlítva.



18. ábra
A biogáz H_2S és NH_3 tartalmának változása a 20K jelű keverék fermentációja során



19. ábra
A biogáz minták maximális kén-hidrogén és ammónia tartalma

5. Összefoglalás

A biogáz hatalmas potenciállal rendelkezik több területen. A biogázgyártás során feldolgozhatók a szerves hulladékok, miközben hasznosítható energia termelhető. Többféle alapanyag közös fermentációjával további előnyök érhetők el, ezért kísérleteket végeztem egy nagy mennyiségben rendelkezésre álló hulladék (sertéstrágya) és néhány alulértékelt és kismértékben alkalmazott biomassza (vízi növények) közös fermentációja kapcsán. A kísérletekhez választott vízinövények a közönséges valiznéria, a széleslevelű gyékény, az úszó kagylótutaj és vízi rucaöröm voltak, melyek inváziós tulajdonságaik miatt tágtűrésű és gyorsan növekedő növények, és akár termeszthetők is biogáztermelés céljából.

A kísérletekhez az Energia- és Minőségügyi Intézetben rendelkezésre álló fermentor rendszert továbbfejlesztettem, és fermentációs kísérleteket végeztem különböző alapanyagokkal és alapanyag keverékek felhasználásával.

Az alapanyagok legfontosabb tulajdonsága biogáz előállítás szempontjából a C/N arány, ez a rucaöröm kivételével minden esetben az optimális érték alatt volt, és az előállított keverékek sem érték el az optimális tartományt.

Biogáz termelés tekintetében a rucaöröm és a valiznéria kisebb hozamot mutatott a trágyához viszonyítva, itt egyértelműen gátló hatások érvényesültek, míg a kagylótutaj és gyékény 10 és 20%-ban történő trágyához adagolása megtöbbszörözte a gázhozamot. A gázmennyiséget és gázösszetételt vizsgálva a metánhozam is ezeknél a növényeknél volt a legnagyobb, míg a gáz felhasználását legjobban nehezítő komponensek, az ammónia és a kénhidrogén ezek esetén sokkal alacsonyabb volt, mint ami a trágya esetén mérhető volt.

Eredményeim alapján az úszó kagylótutaj és a szélesevelű gyékén jelentős potenciállal rendelkező bigáz alapanyag lehet, amit akár szennyvíztisztítókban, hígtrágya pihentető lagúnákban lehetne termeszteni és időszakosan a biogáz rendszer kiegészítő alapanyagaként is szolgálhat.

6. Irodalomjegyzék

[1] „Global Electricity Review 2022”, *Ember*, 2022. március 29. https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/ (elérés 2022. október 10.).

[2] „Share of electricity production by source”, *Our World in Data*. https://ourworldindata.org/grapher/share-elec-by-source (elérés 2022. október 10.).

[3] „Renewable energy targets”. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en (elérés 2022. október 7.).

[4] „IRENA_Renewable_energy_highlights_July_2022.pdf”. Elérés: 2022. október 10. [Online]. Elérhető: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Renewable_energy_highlights_July_2022.pdf?la=en&hash=F3180CE10D7EEB3409165D168ED6E4F494D58AB5

[5] „WBA-globalreport-56ppa4_digital.pdf”. Elérés: 2022. szeptember 13. [Online]. Elérhető: https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2019/07/WBA-globalreport-56ppa4_digital.pdf

[6] Y. Li *és mtsai.*, „Composition and Toxicity of Biogas Produced from Different Feedstocks in California”, *Environ. Sci. Technol.*, köt. 53, sz. 19, o. 11569–11579, okt. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b03003.

[7] N. Thomas, „CHAPTER 2 - Energy”, in *Field Guide to Appropriate Technology*, B. Hazeltine és C. Bull, Szerk. San Diego: Academic Press, 2003, o. 157–275. doi: 10.1016/B978-012335185-2/50046-2.

[8] József D. H., „BIOGÁZÜZEMEK MŰKÖDÉSE ÉS BIOGÁZ ÜZEMI TECHNOLÓGIÁK”, o. 15.

[9] Dr. Bai Attila, *A biogáz*. Száz magyar falu könyvesháza Kht., 2007.

[10] M. J. B. Kabeyi és O. A. Olanrewaju, „Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition”, *J. Energy*, o. 43.

[11] E. M. Gustafsson, J. Ammenberg, J. D. Murphy, és M. Centre, „IEA Bioenergy Task 37 – A perspective on the state of the biogas industry from selected member countries”, o. 65.

[12] „AnenergysectorroadmaptocarbonneutralityinChina.pdf”. Elérés: 2022. szeptember 15. [Online]. Elérhető: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9448bd6e-670e-4cfd-953c-32e822a80f77/AnenergysectorroadmaptocarbonneutralityinChina.pdf?fbclid=IwAR0iyLUDjnZh3baYGI39z55crmSpqBqUQBYNHfD_vuRmiIfOAZRn-HDX5EQ

[13] „Global biogas market forecast 2022 to 2027”, *Energy Global*, 2022. március 10. https://www.energyglobal.com/bioenergy/10032022/global-biogas-market-forecast-2022-to-2027/ (elérés 2022. szeptember 12.).

[14] M. Gustafsson és S. Anderberg, „Biogas policies and production development in Europe: a comparative analysis of eight countries”, *Biofuels*, köt. 13, sz. 8, o. 931–944, szept. 2022, doi: 10.1080/17597269.2022.2034380.

[15] K. Károly, „A biogáz termelés jelentősége Magyarországon”, jan. 2013.

[16] „GfC_national-biomethane-potentials_070722.pdf”. Elérés: 2022. szeptember 15. [Online]. Elérhető: https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2022/07/GfC_national-biomethane-potentials_070722.pdf?fbclid=IwAR2UAYLXXaoQrB__cuVKIJ5UlKEuG00V4CbyVRB92VQ9GrxDc-x4azKUO3M

[17] E. Winquist *és mtsai.*, „Expert Views on the Future Development of Biogas Business Branch in Germany, The Netherlands, and Finland until 2030”, *Sustainability*, köt. 13, sz. 3, Art. sz. 3, jan. 2021, doi: 10.3390/su13031148.

[18] Heinz Schulz és Barbara Eder, *Biogázgyártás*. Budapest: CSER Kiadó, 2005.

[19] „Number of pigs worldwide 2022”, *Statista*. https://www.statista.com/statistics/263963/number-of-pigs-worldwide-since-1990/?fbclid=IwAR0SqLqWHKbEcGzym5RGpKtpFSfxbvg7OWzTEPwSqfGik9rK98fVHJPtI8s (elérés 2022. szeptember 25.).

[20] „Number of pigs worldwide by country 2022”, *Statista*. https://www.statista.com/statistics/263964/number-of-pigs-in-selected-countries/ (elérés 2022. szeptember 25.).
[21] N. en V. Ministerie van Landbouw, „Hungary: Why is the pig sector in a crisis? - Nieuwsbericht - Agroberichten Buitenland”, 2022. március 18. https://www.agroberichtenbuitenland.nl/actueel/nieuws/2022/03/18/hungary-pig-sector-troubles (elérés 2022. szeptember 25.).
[22] József O., György P., Szilvia T. S., Gábor R., és Imre G., „Sertéstrágya anaerob kezelése”, o. 10.
[23] „Global natural gas consumption 2021”, *Statista*. https://www.statista.com/statistics/282717/global-natural-gas-consumption/ (elérés 2022. szeptember 26.).
[24] B. Riaño, B. Molinuevo, és M. C. García-González, „Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine manure with winery wastewater”, *Bioresour. Technol.*, köt. 102, sz. 5, o. 4131–4136, márc. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.12.077.
[25] M. Dębowski, J. Kazimierowicz, M. Zieliński, és I. Bartkowska, „Co-Fermentation of Microalgae Biomass and Miscanthus × giganteus Silage—Assessment of the Substrate, Biogas Production and Digestate Characteristics”, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Elérés: 2022. szeptember 26. [Online]. Elérhető: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/14/7291/pdf
[26] H. Tian, N. Duan, C. Lin, X. Li, és M. Zhong, „Anaerobic co-digestion of kitchen waste and pig manure with different mixing ratios”, *J. Biosci. Bioeng.*, köt. 120, jan. 2015, doi: 10.1016/j.jbiosc.2014.11.017.
[27] L. Sallai, „Co-fermentation experiments with agricultural main products and liquid pig manure”, *Rev. Agric. Rural Dev.*, köt. 5, sz. 1–2, Art. sz. 1–2, jan. 2016, doi: 10.14232/rard.2016.1-2.109-114.
[28] „Anaerobic co-digestion of pig manure with dried maize straw :: BioResources”. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/ (elérés 2022. október 1.).
[29] M. Lopes, P. Baptista, E. Duarte, és A. L. N. Moreira, „Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of pig slurry and horse manure with mechanical pre-treatment”, *Environ. Technol.*, köt. 40, sz. 10, o. 1289–1297, ápr. 2019, doi: 10.1080/09593330.2017.1420698.
[30] T. Adeleye, H. Yeo, R. Seth, H. Hafez, és N. Biswas, „Influence of mix ratio of potato peel and pig manure on reaction kinetics and methane recovery from anaerobic co-digestion”, *Can. J. Civ. Eng.*, köt. 49, sz. 5, o. 675–682, máj. 2022, doi: 10.1139/cjce-2020-0671.
[31] S. Astals, V. Nolla Ardevol, és J. Mata-Álvarez, „Thermophilic Co-digestion of Pig manure and crude glycerol: process performance and digestate stability”, *J. Biotechnol.*, köt. 166, máj. 2013, doi: 10.1016/j.jbiotec.2013.05.004.
[32] Q. Zhang, L. Zeng, X. Fu, F. Pan, X. Shi, és T. Wang, „Comparison of anaerobic co-digestion of pig manure and sludge at different mixing ratios at thermophilic and mesophilic temperatures”, *Bioresour. Technol.*, köt. 337, o. 125425, okt. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125425.
[33] R. Marchetti, C. Vasmara, és F. Fiume, „Pig slurry improves the anaerobic digestion of waste cooking oil”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, köt. 103, okt. 2019, doi: 10.1007/s00253-019-10087-8.
[34] „AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2018/ 2001 IRÁNYELVE - (2018. december 11.) - a megújuló energiaforrásokból előállított energia használatának előmozdításáról”, o. 128.
[35] E. Martínez-Gutiérrez, „Biogas production from different lignocellulosic biomass sources: advances and perspectives”, *3 Biotech*, köt. 8, sz. 5, o. 233, máj. 2018, doi: 10.1007/s13205-018-1257-4.
[36] H. T. T. Nong, Y. Unpaprom, K. Whangchai, S. Buochareon, és R. Ramaraj, „Assessment of the effects of anaerobic co-digestion of water primrose and cow dung with swine manure on biogas yield and biodegradability”, *Biomass Convers. Biorefinery*, köt. 12, sz. 3, o. 857–867, márc. 2022, doi: 10.1007/s13399-020-01115-z.
[37] X. Jiang, X. Song, Y. Chen, és W. Zhang, „Research on biogas production potential of aquatic plants”, *Renew. Energy*, köt. 69, o. 97–102, szept. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.03.025.

[38] M. Wang, E. Lee, Q. Zhang, és S. J. Ergas, „Anaerobic Co-digestion of Swine Manure and Microalgae Chlorella sp.: Experimental Studies and Energy Analysis”, *BioEnergy Res.*, köt. 9, sz. 4, o. 1204–1215, dec. 2016, doi: 10.1007/s12155-016-9769-4.
[39] „Invasive Aquatic Plants”, *Invasive Species Centre*. https://www.invasivespeciescentre.ca/invasive-species/meet-the-species/invasive-aquatic-plants/ (elérés 2022. október 20.).
[40] „*Pontederia crassipes*”, *Wikipedia*. 2022. október 10. Elérés: 2022. október 20. [Online]. Elérhető: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pontederia_crassipes&oldid=1115180947
[41] „Water hyacinth in Lake Victoria”, *Wikipedia*. 2022. február 22. Elérés: 2022. október 20. [Online]. Elérhető: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Water_hyacinth_in_Lake_Victoria&oldid=1073479130
[42] Csiszár Á. és Nyugat-Magyarországi Egyetem, Szerk., *Inváziós növényfajok Magyarországon*. Sopron: Nyugat-magyarországi Egyetem K, 2012.
[43] P. Tripathi, R. Kumar, A. K. Sharma, A. Mishra, és R. Gupta, „Pistia stratiotes (Jalkumbhi)”, *Pharmacogn. Rev.*, köt. 4, sz. 8, o. 153–160, 2010, doi: 10.4103/0973-7847.70909.
[44] N. Cong, T. Duc Thanh, L. T. M. Kha, és H. Nguyen, „Water Lettuce (Pistia stratiotes L.) as a Potential Material for Biogas Production”, *J. Ecol. Eng.*, köt. 23, o. 182–188, ápr. 2022, doi: 10.12911/22998993/148197.
[45] R. Pantawong, A. Chuanchai, P. Thipbunrat, Y. Unpaprom, és R. Ramaraj, „Experimental Investigation of Biogas Production from Water Lettuce, Pistia stratiotes L.”, o. 6, 2015.
[46] P. C. Nipaney és M. B. Panholzer, „Influence of temperature on Biogas Production from Pistia stratiotes”, *Biol. Wastes*, köt. 19, sz. 4, o. 267–274, jan. 1987, doi: 10.1016/0269-7483(87)90060-7.
[47] S. A. Abbasi, P. C. Nipaney, és M. B. Panholzer, „Biogas production from the aquatic weed Pistia (Pistia stratiotes)”, *Bioresour. Technol.*, köt. 37, sz. 3, o. 211–214, jan. 1991, doi: 10.1016/0960-8524(91)90185-M.
[48] T. Güngören Madenoğlu *és mtsai.*, „Kinetic analysis of methane production from anaerobic digestion of water lettuce (Pistia stratiotes L.) with waste sludge”, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, köt. 94, sz. 6, o. 1893–1903, 2019, doi: 10.1002/jctb.5968.
[49] „Typha latifolia - Useful Tropical Plants”. https://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Typha+latifolia (elérés 2022. október 23.).
[50] „GISD”. http://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=895 (elérés 2022. október 23.).
[51] A. petrovič, L. Čuček, és M. Simonič, „Anaerobic Co-digestion of Sewage Sludge and Typha Latifolia and the Impact of Cattle Rumen Fluid on Biogas Production”, máj. 2020, o. 235–246. doi: 10.18690/978-961-286-353-1.19.
[52] C. Hartung *és mtsai.*, „Suitability of paludiculture biomass as biogas substrate − biogas yield and long-term effects on anaerobic digestion”, *Renew. Energy*, köt. 159, o. 64–71, okt. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.156.
[53] D. Allen (IUCN), „IUCN Red List of Threatened Species: Salvinia natans”, *IUCN Red List Threat. Species*, júl. 2011, Elérés: 2022. október 23. [Online]. Elérhető: https://www.iucnredlist.org/en
[54] S. Kłosowski, P. Pawlikowski, E. Jabłońska, és M. Podgórska, „Habitat conditions of the Salvinia natans phytocoenoses in the Vistula and Odra river valleys in Poland”, *TUEXENIA*, köt. 40, o. 327–344, nov. 2020, doi: 10.14471/2020.40.002.
[55] V. Filyarovskaya, M. Sitarska, T. Traczewska, és M. Wolf, „Microbiological stimulation of phytoremediation process using Salvinia natans to mercury contamined water”, *E3S Web Conf.*, köt. 22, o. 00047, nov. 2017, doi: 10.1051/e3sconf/20172200047.
[56] S. Kumari, B. Kumar, és R. Sheel, „Bioremediation of Heavy Metals by Serious Aquatic Weed, Salvinia”, o. 14, 2016.
[57] R. J. Thilakar, „Phytoaccumulation of Chromium and Copper by Pistia stratiotes L. and Salvinia natans (L.) All.”, o. 6, 2012.

[58] „Vallisneria spiralis (eelweed)”, *Invasive Species Compendium*. 2022. [Online]. Elérhető: https://www.cabi.org/isc/datasheet/56573#tosummaryOfInvasiveness
[59] G. Nagy, „Submerged aquatic plant (Vallisneria spiralis and Egeria densa) utilisation as a biogas cleaner and feedstock of co-digestion”, *Int. J. Eng. Manag. Sci.*, köt. 4, o. 172–180, nov. 2019, doi: 10.21791/IJEMS.2019.4.19.
[60] V. Singhal és J. P. N. Rai, „Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents”, *Bioresour. Technol.*, köt. 86, sz. 3, o. 221–225, febr. 2003, doi: 10.1016/S0960-8524(02)00178-5.
[61] M. Kaltschmitt, H. Friedmann, és G. Goertz, „Fermentation of organic materials - VDI guideline 4630; Vergaerung organischer Stoffe - VDI-Richtlinie 4630”, júl. 2005, Elérés: 2022. november 14. [Online]. Elérhető: https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20682804
[62] J. A. Siles, J. Brekelmans, M. A. Martín, A. F. Chica, és A. Martín, „Impact of ammonia and sulphate concentration on thermophilic anaerobic digestion”, *Bioresour. Technol.*, köt. 101, sz. 23, o. 9040–9048, dec. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.163.
[63] I. Konkol, J. Cebula, és A. Cenian, „Oxidization of hydrogen sulfide in biogas by manganese (IV) oxide particles”, *Environ. Eng. Res.*, köt. 26, sz. 2, o. 190343–0, ápr. 2020, doi: 10.4491/eer.2019.343.
[64] E. Dumont, „H2S removal from biogas using bioreactors: a review”, *Int. J. Energy Environ.*, köt. 6, sz. 5, o. 479–498, 2015.
[65] P. Costamagna, A. Giordano, Y. Lazzarini, M. Delucchi, és G. Busca, „Process of ammonia removal from anaerobic digestion and associated ammonium sulphate production: Pilot plant demonstration”, *J. Environ. Manage.*, köt. 259, o. 109841, ápr. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109841.
[66] D. P. B. T. B. Strik, A. M. Domnanovich, és P. Holubar, „A pH-based control of ammonia in biogas during anaerobic digestion of artificial pig manure and maize silage”, *Process Biochem.*, köt. 41, sz. 6, o. 1235–1238, jún. 2006, doi: 10.1016/j.procbio.2005.12.008.