

**Óbudai Egyetem**  
**Doktori (PhD) értekezés**



**Speciális mechanikus előkezelés hatásának  
vizsgálata biogáz hozam növelése céljából**

Bakosné Diószegi Mónika

Témavezető:

Dr. Horváth Miklós

**Biztonságtudományi Doktori Iskola**

Budapest, 2015

### Szigorlati bizottság:

Elnök: Dr. Rajnai Zoltán, egyetemi tanár, ÓE

Tagok: Horváthné Dr. Drégelyi-Kiss Ágota, docens, ÓE

Dr. Simon Ákos (külső)

### Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök: Dr. Rajnai Zoltán, egyetemi tanár, ÓE

Titkár: Dr. Szűcs Endre egyetemi adjunktus, ÓE

Opponensek: Dr. habil. Csóka Levente, NYME

Dr. habil. Pándi Erik, NKE

Tagok: Dr. Czifra Árpád, ÓE

Dr. Csizmazia Zoltán professzor emeritus, DE

Dr. Bagi Zoltán, SZTE

### Nyilvános védés időpontja:

# Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés.....	7
1.1.	A téma aktualitása .....	7
1.1.1.	Az Európai Unió energiabiztonsága.....	7
1.1.2.	Magyarország energiabiztonsága .....	9
1.1.3.	Témaválasztás indoklása .....	11
1.2.	Célkitűzések.....	12
1.3.	Hipotézisek .....	13
2.	A kutató munka tudományos előzményei a szakirodalomban.....	14
2.1.	A biogáz képződés elméleti alapjai és a biogáz termelés .....	14
2.1.1.	A biogáz képződése.....	14
2.1.2.	Biogáz üzemek és a biogáz előállítás technológiája.....	16
2.1.3.	Magyarországi üzemek általános problémái napjainkban.....	19
2.2.	Biogáz alapanyagok előkezelésének eljárásai .....	21
2.3.	Növényi biomassza előkezelése rothasztási hatásfok növelése céljából .....	22
2.3.1.	A lignocellulóz bomlási jellemzői.....	22
2.3.2.	Növényi eredetű biomassza termikus, kémiai és biológiai előkezelési eljárásai.....	25
2.3.3.	A növényi eredetű biomassza mechanikus előkezelési eljárásai.....	28
2.4.	A szennyvíziszap mechanikai előkezelése rothasztási hatásfok növelése céljából .....	29
2.4.1.	Szennyvíztelepek működése, az iszapkezelés folyamata .....	30
2.4.2.	Ultrahangos bontási eljárás .....	32
2.4.3.	Őrlés, gyöngymalom .....	36
2.4.4.	Sűrítő centrifuga és folyadéknyírásos technológia.....	37
2.5.	Iszapkezelő technológia alkalmazása biomassza szubsztrátum előkezelésére .....	39
3.	A vizsgálat alapanyagai, eszközei, a mérések módszerei és eljárásainak ismertetése.....	40
3.1.	Mérési alapanyagok.....	40
3.1.1.	A búzaszalma, mint kísérleti alapanyag .....	40
3.1.2.	Szennyvíztelepi fermentáció, mint fermentációs alapanyag .....	42

3.1.3. Mezőgazdasági szubsztrátummal üzemelő biogáz reaktor fermentleve, mint fermentációs alapanyag.....	45
3.1.4. Oltóiszap fajták.....	46
3.1.5. A felhasznált alapanyagok előkészítése, tárolása.....	46
3.2. Mérési eszközök és berendezések .....	47
3.2.1. A folyadéknívó és ütközés elvén alapuló előkezelő berendezés.....	47
3.2.2. A labormérés eszközei.....	49
3.3. Biogáz batch mérés leírása .....	54
3.4. Gázelemzés leírása .....	56
3.5. KOI mérés leírása.....	56
3.6. Szárazanyag és szerves szárazanyag-tartalom mérés leírása.....	57
3.7. A pH mérés.....	58
3.8. A búzaszalma szubsztrátum kísérletterve és a kísérlet leírása.....	59
3.9. A szennyvíziszap fermentlé és mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum fermentációs kísérletterve és a kísérlet leírása.....	62
4. A kísérletek eredményei .....	65
4.1. Búzaszalma fermentációjának kísérleti eredményei.....	65
4.1.1. A búzaszalma szubsztrátum biogáz és metánhozam eredményei .....	65
4.1.2. A degradáció időbeli lefutása.....	66
4.1.3. Az eredmények igazolása.....	67
4.1.4. Energiamérleg .....	70
4.1.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálata búzaszalma szubsztrátum esetén .....	73
4.2. Szennyvíziszap fermentlé utófermentációjának kísérleti eredményei.....	77
4.2.1. A szennyvíziszap fermentlé biogáz és metánhozam eredményei.....	77
4.2.2. Degradáció időbeli lezajlása.....	79
4.2.3. Az eredmények igazolása.....	81
4.2.4. Energiamérleg .....	83
4.2.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálata szennyvíztelepi fermentlé szubsztrátum esetén.....	84

4.3. Mezőgazdasági alapú fermentlé utófermentációjának kísérleti eredményei .....	87
4.3.1. A mezőgazdasági fermentlé biogáz és metánhozam eredményei .....	87
4.3.2. Degradáció időbeli lezajlása.....	88
4.3.3. Az eredmények igazolása .....	90
4.3.4. Energiamérleg .....	92
4.3.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálata mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum esetén.....	92
5. Az eredmények összefoglalása, elemzése .....	96
5.1. Búzaszalma szubsztrátum fermentációjának összegzése.....	96
5.1.1. Biogáz és metánhozam .....	96
5.1.2. A degradáció időbeli lezajlása.....	96
5.1.3. A fermentációs rothasztási eredményt igazoló vizsgálatok.....	97
5.1.4. Energiamérleg .....	97
5.1.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálati összegzése búzaszalma fermentációja szempontjából.....	97
5.2. Szennyvíziszap fermentlé utófermentációjának összegzése.....	98
5.2.1. Biogáz és metánhozam .....	98
5.2.2. A degradáció időbeli lezajlása.....	98
5.2.3. A fermentációs rothasztási eredményt igazoló vizsgálatok.....	99
5.2.4. Energiamérleg .....	99
5.2.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálati összegzése szennyvíziszap fermentlé utófermentációja szempontjából .....	99
5.3. Mezőgazdasági fermentlé utófermentációjának összegzése.....	100
5.3.1. Biogáz és metánhozam .....	100
5.3.2. A degradáció időbeli lezajlása.....	100
5.3.3. A fermentációs rothasztási eredményt igazoló vizsgálatok.....	101
5.3.4. Energiamérleg .....	101
5.3.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálati összegzése mezőgazdasági fermentlé utófermentációja szempontjából .....	101
5.4. Vizsgált szubsztrátumok fermentációjának összehasonlítása.....	102

Új tudományos eredmények, tézisek.....	104
Az eredmények hasznosítási lehetősége.....	107
Függelék, az anaerob degradáció fogalomtára .....	108
Hivatkozott irodalom.....	111
Ábrajegyzék.....	119
Köszönetek.....	122
Mellékletek.....	123

# 1. Bevezetés

Az elmúlt években az energiaellátás és energiafelhasználás problémája a biztonság kérdéskörének, így a nemzetközi biztonsági tanulmányok tárgykörének is egyik kulcskérdésévé vált. A biztonság fogalma kiegészült az energiabiztonsággal és az ezzel szorosan összefüggő klímabiztonsággal. Az energiabiztonság különösen azon térségeket és országokat érinti – így az Európai Unió tagállamait, s köztük hazánkat is –, melyek jelentős mennyiségű energiát használnak fel, miközben szénhidrogén kincsekben szegények.

Hazánk energia-kiszolgáltatottsága igen nagyfokú (2002 óta 60% fölötti). Megfelelő intézkedéssel és támogatási rendszerrel ösztönözni kell az energiaszektorba beruházni kívánókat. Célszerű serkenteni a kihasználatlan, és éppen ezért napjainkban csak egyfajta „*tartalékként*” jelen lévő kapacitások kiaknázását. A többféle energiatípusra támaszkodó gazdaságok kiépítése, az alternatív energiaforrások felhasználásának fejlesztése fontos törekvés. Magyarország kitűnő természeti adottságának köszönhetően jelentős a faipari, a mezőgazdasági és az állattenyésztési tevékenység. Ésszerű e területek visszamaradó szerves hulladékából előállítható energiahordozó hasznosítását előtérbe helyezni. A széntartalmú hulladék anyagok anaerob degradációja során keletkező értékes biogáz nagy lehetőségekkel rendelkező megújuló energiaforrás lehet hazánkban.

E légnemű energiahordozó előállításának hatékonysága – a mennyiségének és minőségének növelése-, serkentőleg hathat a biogáz erőmű beruházásokra. Elterjedése jelentősen csökkenthetné a hazai energiafüggetlenséget.

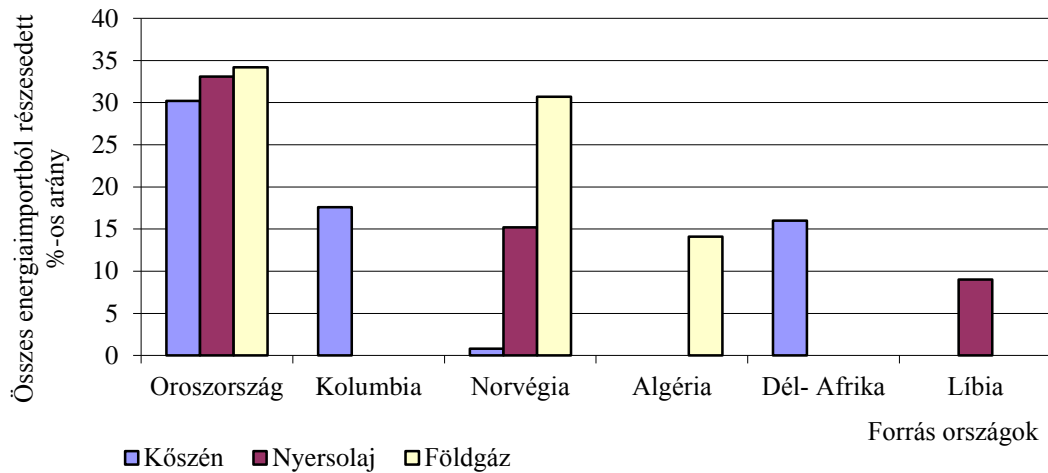
## 1.1. A téma aktualitása

### 1.1.1. *Az Európai Unió energiabiztonsága*

Az Európai Unió országaira jellemzően a primer-energia termelés és a felhasználás közötti eltérés az energiaellátás biztonságával kapcsolatosan aggályokat okoz. A jelentkező energiahiányt az Európai Unió harmadik országokból származó energiaforrásokkal pótolja. A számok azt mutatják, hogy 2010-ben az Unión belüli energiafelhasználás több mint fele (53,9%) importból származott. Nettó exportőr ezen időszakban csupán Dánia volt [1,2].

A nagymértékű hiány oka, hogy a térség nyersanyag kincsei kimerültek, vagy gazdaságosan nem kitermelhetők. Az Egyesült Királyság, amely 1999-ben az Európai Unió 27 államának összenergia (812,2 millió tonna olajegyenérték, a továbbiakban toe) termelésében a 23,9%-os kitermelési részaránnyal élen járó volt, 2010-re már csak 19,2% -ot tudott elérni. Jelentős visszaesést mutatott e tekintetben Németország (–16,2 millió toe) és Lengyelország (–16,2 millió toe) is. Néhány ország

enyhe termelési növekedést mutatott, köztük a legnagyobb fejlődést Hollandia (3,7 millió toe) és Franciaország (2,4 millió toe) produkálta.

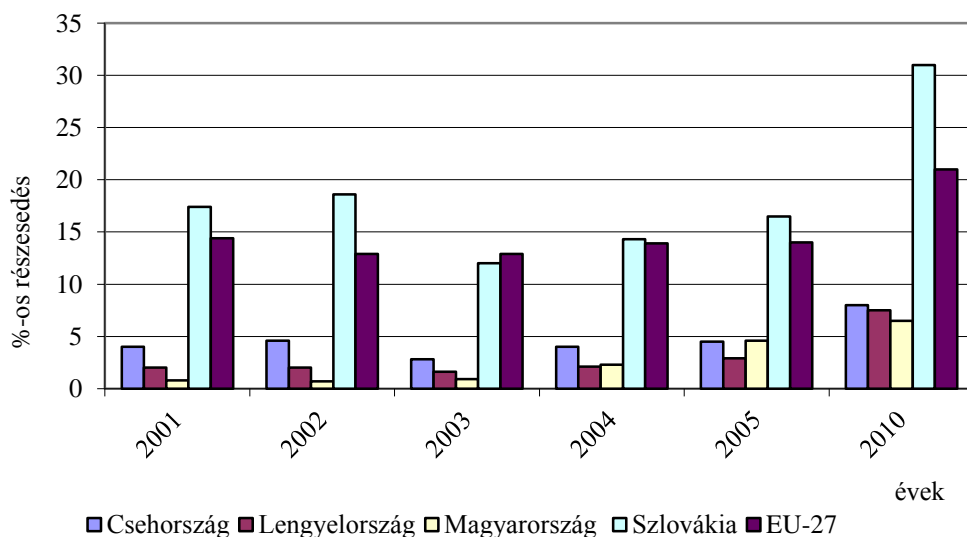


1. ábra Az EU primer energiainportjának fő forrásországai 2008-ban [3]

A szembeötlő – első sorban fosszilis –, energia beszerzési kényszer okozta kiszolgáltatottság megnövelte az alternatív energiák iránti igényeket. A megújuló energiaforrásból származó energiatermelés az EU-ban 2002-től kezdődően 2010-ig bezárólag rohamos növekedést mutatott. Az egyszerű és olcsó technológiával kibányászható fosszilis készlet apadása, valamint az új drágább technológia működtetése miatt a kitermelés a kőolaj (–42,3%), és a földgáz esetében (–24,6%) csökkenést mutatott.

Az Európai Unió tagállamaiba beérkező három jelentős primer energia (kőszén, nyersolaj, földgáz) fő beszállítója Oroszország, ahonnan az import kőolaj 30%-a, és a földgáz 40%-a érkezett. Norvégia 16%, illetve 23%-kal részesedett az uniós energiainportból. [3] Legnagyobb függőséget a földgáz hiány okozza: Szlovéniában 99%, Szlovákiában 95%, Csehországban 92%, míg Magyarországon közel 80% a teljes gázfelhasználás Oroszországból érkező importjának részaránya a 2011-es adatok alapján (1. ábra).





2. ábra A megújuló energiaforrásokból megtermelt villamosenergia részaránya %-os értékben [3]

Az Európai Unió 27 tagállama által megújuló energiaforrásból termelt villamosenergia 21%-os átlagosnak tekinthető részarányát Szlovákia bőven túlhaladta. Bár Lengyelország és Csehország is alul teljesített, hazánk a 2010-ben elért 7%-os termelésével a térség abszolút sereghajtójának tekinthető.

### 1.1.2. Magyarország energiabiztonsága

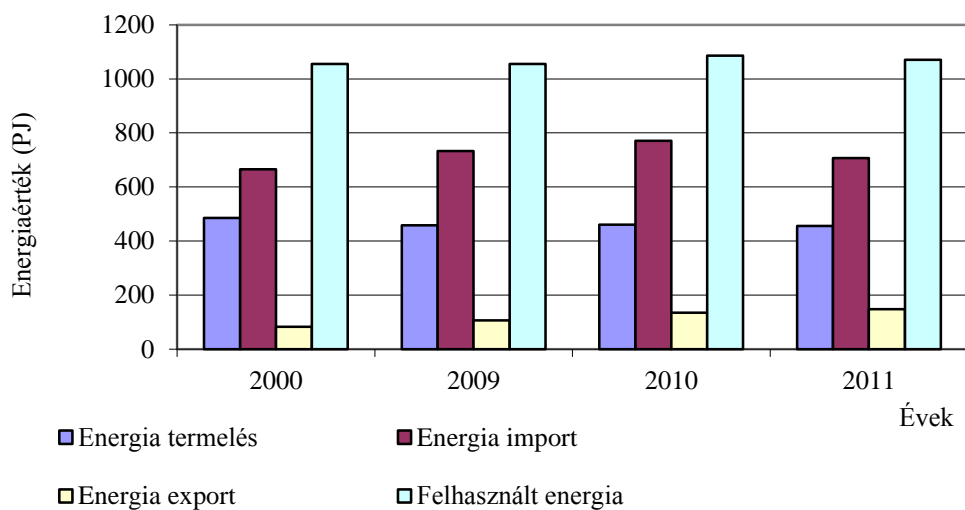
Magyarország energiaigényét tekintve a tagállamok között a középmezőnyben foglal helyet (2011-ben 1071 PJ), ugyanakkor energiafüggősége átlag feletti (1. táblázat). 2007-ben és 2008-ban az energiafelhasználás több mint 60%-a importból származott.

1. táblázat Magyarország energiainport változása 2008-ig [3]

Energiainport %-ban meghatározva										
Évek	1995	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
összesen	47,8	53,2	55,2	53,3	57,2	62,1	61,1	63,5	63,1	62,8

Napjainkra ez az érték számottevően nem változott, a felhasznált energia mennyisége és az energiatermelés közel állandónak tekinthető, míg az energiainport a 2010-es 770 PJ-ről 2011-re 707 PJ-ra kis mértékben, de csökkent. Az energiaexport ugyanakkor a 2000-es évhez képest, ha kis mennyiséget képviselve is, de egyenesen 55%-os emelkedést mutat (82 PJ-ről 148 PJ-ra) (3. ábra).

Magyarországon a megújuló energiaforrásokból megtermelt primer energia mennyisége 2001-től napjainkig 20%-os növekedést mutat (497,9 toe-ről 597,1 toe-re) [4].



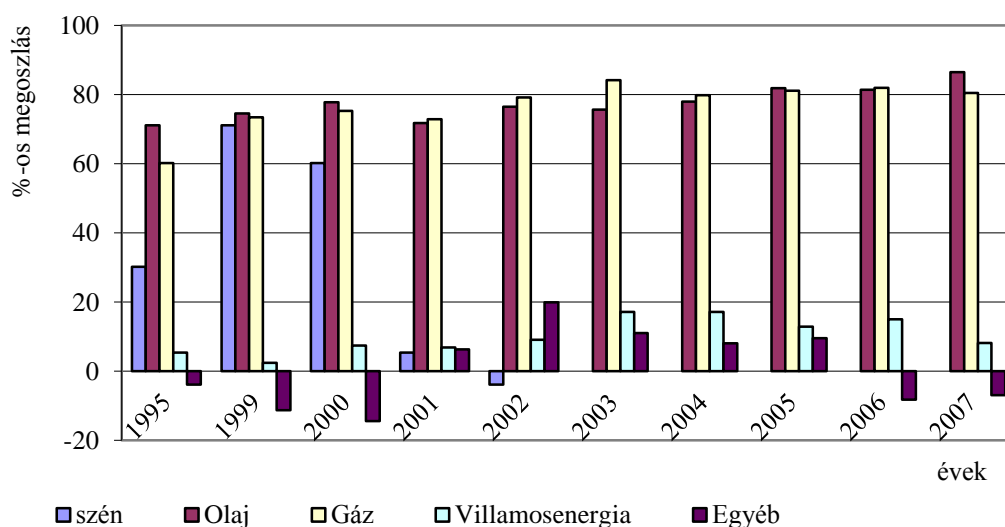
3. ábra Magyarország energiamérlege [3]

Hazánkban – az atomenergia jelentős részarányának köszönhetően –, a villamosenergia előállítás körülbelül 60%-a fosszilis energia felhasználásával történik. Az egyre növekvő energiaéhség és az ezzel együtt járó villamosenergia-termelés iránti növekvő igény komoly terhelést jelent környezetünkre, valamint fokozza a fosszilis energiaforrások kimerülésének felgyorsulását. Az EU stratégiai célkitűzése a megújuló energiák felhasznált részarányának jelentős növelése a villamosenergia előállításában is.

A hazai megújuló forrásból fedezett villamosenergia előállítás a 2000-es években 0,7% volt. Bár ez az érték jelentősen növekedett, 2011-ben még mindig 10% alatti volt a részarány. Ezen belül is a biogázzal megtermelt primer energia mennyisége növekedett a legnagyobb mértékben 2000-től 2012-ig 2,6%-ról 23,31%-ra, közel kilencszerezes értékben.

A honi energiafogyasztás fedezetének hiánya főként az olaj és a földgáz nagy mennyiségű felhasználásából adódik. Az 1990-es évek elején induló gázprogram hatására jelentős mértékben nőtt a földgázfogyasztás. Ennek következménye a „gázfüggőség” további, több mint 20%-os hiány növekedése 1995-től (4. ábra). Az így megnövekedett nyersanyagigény okozta a földgáz nagy mennyiségű importját, ami kiszolgáltatottá tette hazánkat a térség szeszélyes kül- és belpolitikai viszonyainak. A földgázfogyasztás 2008-ig megközelítette a 14 milliárd m<sup>3</sup>-t, ami az ország akkori teljes energiafogyasztásának 70%-a volt [5].

A földgáz készletek csökkenése, egyre dráguló kiaknázása és szállítása miatt a gáz ára 2010-ig drasztikus növekedést mutatott. 2010-től kezdődően napjainkig a „rezsicsökkentés” program keretein belül erőteljes törekvések mutatkoznak hazánkban a magas energiaárak leszorítására. Ezt támasztja alá a 2010 tavaszán aláírt Paksi atomerőmű bővítésének szerződése, mely hosszú távú, hazai, viszonylag olcsó energiaforrást biztosíthat.



4. ábra Az energiafüggőség indikátora: nettó import mennyiség/bruttó belföldi energia felhasználása [6]

Magyarország az import gázt Szlovákián és Ausztrián keresztül a HAG-vezetéken, Ukrajnán keresztül a Testvériség vezetéken keresztül kapja. Bár az előbbiben norvég vagy holland gáz is jöhetne, jelenleg orosz földgázt vásárolunk mindkettőn. Az összességében vett 80%-os országos földgázimport függőségünk csaknem teljes egészében Oroszország felé alakult ki.

A Közép-, és Kelet-Európai térség energiabiztonságát alapvetően megrengető orosz–ukrán „gázháború” valós fenyegetést jelent napjainkban is. 2009. január 6-án az Oroszországból Európába érkező, Ukrajnán átmenő földgázvezeték szakaszában – a két ország gázszolgáltató cégei közötti gazdasági viták miatt – a gázellátást megszüntették. Magyarországra a 40 millió m<sup>3</sup> napi import földgázmennyiségből 2009. január 6-án a csővezetékrendszer végleges kiürülése után már gáz nem érkezett. Annak ellenére, hogy hazánkban napi 10 millió m<sup>3</sup> gázkitermelés továbbra is folyt, aznap este már elrendelték az I. rendű, január 7-én a II. rendű gázkorlátozást is [7].

Szerbia a 85%-os gázfüggősége miatt azonnali segítséget kért, mert tartalékával csak egy napra tudta volna fedezni a lakossági gázellátást. Ezt a kérésüket néhány nap elteltével – a hazai nagy mennyiségű gáz tárolására alkalmas gáztározóinknak köszönhetően – Magyarország teljesíteni tudta.

Európa más országaiban is kritikus helyzet alakult ki. Bosznia-Hercegovinában, Macedóniában vagy Bulgáriában is válsághelyzetet rendeltek el, hiszen a földgázszükségletüket szinte teljes egészében az Ukrajnán keresztül jövő gázvezetésekről fedezték.

### 1.1.3. Témaválasztás indoklása

A hazai energiabiztonságot helyezi előtérbe a „Nemzeti Energiastratégia 2030” szakmai dokumentum. Kidolgozott tervet tartalmaz Magyarország mindenkori biztonságos energiaellátásának garantálására, a gazdaság versenyképességének, a környezeti fenntarthatóságnak, és a fogyasztók teherbíró

képességének a figyelembe vételével. (8) A Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Terv 2030-ra a fenntartható energiaellátás érdekében, a megújuló energia arányának emelkedését a primerenergia felhasználásban a mai 7%-os értékről 20% közelébe várja. A 2020-ig megvalósuló növekedési pályának a bruttó energiafelhasználásban a 14,65%-os részarány elérése a kitűzött cél.

Az importigény csökkentésére reális megoldást nyújthatnak a helyi területi adottságot figyelembe vevő alternatív energiafajták. Célravezető megoldás, a többfajta nyersanyag együttes alkalmazása, azaz a megújuló „energiamix”.

A biogáz a forrásmennyiséghez képest, méltánytalanul csekély mértékben előállított megújuló energiahordozó hazánkban. A környezetet hulladékként terhelő szerves anyag anaerob bomlása során, számunkra fontos termék: energia nyerhető.

A biogáz üzemek hatékonyságát vizsgálva jelentős számú tudományos kutatás, folyóirat, könyv és tanulmány foglalkozik a biogáz előállítás optimalizálási, illetve az alapanyag előkezelési technológiák fejlesztésének szükségességével és azok alkalmazásával. Minden esetben cél a biogáz termelés mennyiségének és minőségének növelése, továbbá a lebomlási idő csökkentése érdekében javasolt az előkezelések, aprítási technológiák, a biotechnológiai és metagenomikai módszerek megismerése és alkalmazása.

A már ismert – vagy ez idáig a biogáz előállításban még nem alkalmazott –, alapanyag előkezelő technológiák fejlődése, számos tartalékkal rendelkezik. Az aprítási technológiák mechanikai eljárásait megismerve célszerű olyan fajlagos felületnövelő berendezés hatását megvizsgálni, amely több alapanyag esetében is eredményesen alkalmazható. Az ilyen sokoldalú, új generációs berendezések további vizsgálata és technológiai folyamatának megismerése az elkövetkező időszakban kulcsfontosságú feladat. A magasabb gázhozam, illetve a több nyerhető energia érdekében cél, a megfelelő, alacsony energiaigényű gépegység beillesztése a biogáz előállító üzem rendszerébe.

Magyarországon a rendelkezésre álló alapanyagok alapján becslések szerint akár 700 MW teljesítményt lehetne elérni, mely tizenötszöröse a jelenleg működő és beruházás alatt álló biogáz üzemek teljesítményének. A kiszámíthatóan biztosított bomlási hatékonyság növelése fokozza a biogáz üzemek telepítésének szándékát, közelíti a hazai kihasználhatósági lehetőségeket, és növeli az energiabiztonságot. Decentralizált elhelyezkedésű telepek kiépítése akár 10–15%-kal is csökkenthetné a hazai energiafüggőséget.

## **1.2. Célkitűzések**

Célkitűzéseimet a fent leírtak elemzésével határoztam meg. A témaválasztás aktualitása és indoklása során felmerülő problémákat megállapítottam. A hazai biomassza – mint megújuló energiaforrás –, biogáz felhasználási lehetőségeit tanulmányoztam. A jelenlegi biogáz előállítási gyakorlat során felmerülő, gazdasági és műszaki hiányosságokra rámutattam. Ezek alapján kutatási céloknak tűztem

ki az alapanyag mechanikus előkezelés hatásának vizsgálatát, a fermentáció hatékonysága szempontjából.

Céljaim:

1. Feltárni a szakirodalom alapján a mechanikus előkezelő eljárásokat, majd felkutatni a mezőgazdasági alapanyag, mezőgazdasági fermentlé és szennyvíztelepi fermentlé előkezelésre, felületújítására is alkalmas berendezést.
2. Megkeresni a fent említett alapanyagok fermentálása során azokat az előkezelésre jellemző körülményeket, melyek a biogáz és metán többlet hozamot befolyásolják. Céлом, megállapítani ezek alapján a vizsgálati kísérleti teret.
3. Megállapítani a kísérleti térben az egyes alapanyagok biogáz és metánhozam többleteit, vizsgálva közben a meghatározott körülmények hatását.
4. Megvizsgálni, hogy az előkezelés során befektetett energia és az alapanyagok metánhozam többletének energia értéke az egyes alapanyagok tekintetében hogyan viszonyul egymáshoz.
5. Megvizsgálni, hogy a mezőgazdasági és szennyvíztelepi fermentlevek rothasztása során változik-e a biogáz minősége.

Célkitűzéseimet az átfogó nemzetközi és hazai irodalomkutatást követően érem el. A kísérleti teret és a kísérlet összeállítását a hazai és nemzetközi szakirodalomban alátámasztott módszer alapján kísérlettervezéssel (Design of Experiment) támogatom. A tervezett anaerob fermentációs kísérletet nemzetközi és hazai szabványok és ajánlások alapján végzem el. A kísérlet során kapott (mért) eredmények statisztikai elemzéséhez (ANOVA, MINITAB szoftver) varianciaanalízist és statisztikai programot használok.

### **1.3. Hipotézisek**

- Megvizsgálom, hogy a választott berendezéssel történő kezelés az alapanyagok (mezőgazdasági alapanyag, mezőgazdasági fermentlé és szennyvíztelepi fermentlé) szempontjából biogáz és metántöbbletet idéz-e elő a fermentáció során. Feltételezem, hogy az egyes alapanyagok előkezelésénél meghatározott tényezőknek hatása van a biogáz képződésre. Kutatom azok lehetséges kölcsönhatásait. A kísérleti eredmények alapján meghatározom az egyes alapanyagok biogáz- és metántöbblet várható értékének becült regressziós függvényeit.
- Megvizsgálom, hogy az előkezelés során befektetett energia és az alapanyagok metánhozam többletének energia értéke pozitív energiamérleget eredményez-e mindhárom alapanyag tekintetében.
- Kutatom, hogy a mezőgazdasági és szennyvíztelepi fermentlevek esetében tapasztalható-e minőségi biogáz változás, melynek igazolása az alapanyag kémiai jellemzőjében nyomon követhető.

## 2. A kutató munka tudományos előzményei a szakirodalomban

E fejezetben ismertetem a biogáz képződés optimális körülményeit. Felvázolom a biogáz üzemek tanulmányútja kapcsán kapott átfogó képet az egyes alapanyagokat feldolgozó üzemek technológiájáról. Feltárom a telepek hiányosságait és jövőbeli fejlesztési irányvonalait. Nemzetközi és hazai szakirodalmak alapján végzett kutatásaimat összefoglalom az alapanyagok bomlási jellemzői, és azok különböző előkezelésekre tett hatása körében. A mechanikai előkezelő berendezések ismertetése és hatékonyságuk összesítése után kiválasztom a széles alapanyagra alkalmazható mechanikus elven működő aprító, felületújító berendezést.

### 2.1. A biogáz képződés elméleti alapjai és a biogáz termelés

A megújuló energetikai eljárások között különleges helyet foglal el a biogáz előállítása. Ezzel az anaerob technológiai eljárással sikeresen lehet kezelni, csökkenteni a hulladékok szerves frakcióját. A hulladék kialakulását nem szünteti meg, ugyanakkor kiválóan alkalmas „zöldenergia” előállítására. Ily módon a környezetet terhelő szerves anyag felhasználásával értékes termék, „zöldenergia” nyerhető.

#### 2.1.1. A biogáz képződése

A biogáz a széntartalmú anyagokban lekötött szén elgázosodásából keletkezik. Mindenből nyerhető, aminek az alapja szénhidrát, szerves zsír vagy fehérje.

A biogáz jellemző alapanyagai a következők:

- fás vagy lágyszárú növényzet,
- mezőgazdasági hulladék,
- állati trágya,
- állati hulladék (tetem),
- szennyvíz,
- kommunális hulladék szerves része.

Bárhol, a természetben található szerves anyag anaerob bomlása közben keletkezik biogáz. A folyamat, – ami a mesterségesen létrehozott biogáz telepen megy végbe –, a természetes úton is bekövetkező kémiai folyamatot biztosítja, egyenletesebbé teszi és felgyorsítja, javítva ezzel a rothasztás eredményének hatásfokát.

A szerves anyagokban lekötött szén elgázosodási folyamata alatt a lehető legnagyobb metántartalom elérése a cél, mely érdekében a reaktorban lezajló kémiai folyamatokat kell

megvizsgálni. A gáz főként baktériumok aktivitása során keletkezik, illetve az anyagok lebontásában néhány gomba és alacsonyabb rendű állati szervezet is részt vesz.

A biogáz termelés folyamatát három olyan mikrobiológiai folyamatra lehet bontani, melyek egymásra épülnek és természetes körülmények között szétválaszthatatlanok. Az első lépés a hidrolízis, amelyben az enzimek bontják alkotóelemeire (polimer láncokra) a szerves anyagot, amiket a hidrolizáló baktériumok tovább darabolnak. Második lépésben az acetogén baktériumok a szacharidokat, zsírsavakat, ecetsavakat és az illó szerves savat alakítják át acetáttá és hidrogénné. A harmadik szigorúan anaerob körülmények között végbemenő lépés, amikor a metanogén mikroorganizmusok metán és széndioxid keveréket, biogázt állítanak elő. Az energetikai célra előállítható biogáz mennyiséget tehát a baktériumok táplálékláncának aktivitása befolyásolja.

A folyamat optimális lezajlásához az alábbi feltételek szükségesek:

- oxigénmentes környezet,
- állandó  $t = 20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$  feletti hőmérséklet,
- 50% feletti nedvességtartalom,
- $\text{pH} = 7\sim 7,5$ ,
- megfelelő C/N arány,
- lehetőség szerint fénytől elzárt környezet.

A különböző alapanyagokat aprítás és homogenizálás után juttatják el a speciális tartályba a fermentorba, mely a fent említett körülmények biztosítására alkalmas. Állandó hőmérsékleten tartva szakaszos vagy folyamatos keverés mellett az anyag az anaerob térben bomlásnak indul.

A metántartalom %-os értéke adja a biogáz gazdasági értékét, energetikai szempontból. A vezetékes földgázhoz képest, ami csaknem 100%-os metántartalmú, a biogáz kb. 55–70%-os metántartalommal rendelkezik. A metántartalom nagyban függ az alapanyag összetételétől. A minőséget, vagyis az energiahozamot lehet növelni, úgynevezett elő és utófermentorok sorba állításával. Ezek lehetnek 30–35 °C-os ún. mezofil hőmérsékletű fermentorok, illetve 50–55 °C-os ún. termofil fermentorok is. Szintén a biogáz képződés serkentését váltja ki az alapanyagok különböző termikus, vegyi és mechanikus előkezelési eljárásai vagy azok kombinációi.

Számos mechanikai és kémiai módszert dolgoztak ki, mellyel a szilárd részecskék méretének csökkenésével, a fajlagos felület növelésével lehet a hidrolízist gyorsítani [8].

A mikrobák szaporodása és a biogáz képződés időigénye nagy, a folyamat lassan, több hét alatt megy végbe. A bomlás üteme alapanyagtól függően változik. Míg az állati eredetű anyagoké 8–20 nap, addig a cellulóz alapú anyagok lebomlási ideje közel 40–50 nap. A gáztermelés értéke is hasonlóan alakul, a folyamat időtartamával megegyezően. A gyorsan lebomló anyag arányos idő alatt nagyobb mennyiségű gázt termel. [9] Fontos tehát a hulladékok összeválogatása, hiszen a kiegyensúlyozott gáztermelés több komponensű biomasszával biztosítható.

### 2.1.2. Biogáz üzemek és a biogáz előállítás technológiája

A biogáz üzemek között megkülönböztetünk energiatermelő, vagy szemét „eltüntető” – újrahasznosító működési céllal épült telepeket. A legtöbb helyen mindkét irányvonal jelen van, ugyanakkor az előzőekben felsorolt szempontok az alapanyag és a technológia különbözősége miatt specifikus optimalizálásra szorulnak. Egyformán fontos törekvés a környezetbarát szemlélet és a kiszámítható, nyereségorientált ágazat működtetése [10,11].

A biogáz üzemek csoportosíthatók működési módjuk alapján a szubsztrátum rátáplálásának időszaka (folyamatos, szakaszos, kombinált), az alapanyagok szárazanyag-tartalma (nedves, félszáraz), az építési mód, azaz elrendezés (függőleges, vízszintes, cső), a fermentáció során biztosított hőmérséklettartomány (mezofil, termofil), a szervesanyag degradációs időtartama (2 nap–25 év), és még további szempontok szerint is [12,8].

Magyarországon zömében folyamatos üzemű, vegyes alapanyag összetételű, függőleges elrendezésű, 25–45 napos tartózkodási idővel működő mezofil fermentorok működnek.

Három biogáz üzemcsoportot különíthetünk el az alapanyagok feldolgozásának szempontjából:

- kommunális hulladék szerves részét,
- szennyvíztelepek iszapjait,
- mezőgazdaságból származó alapanyagokat feldolgozó üzemek.

Az első két alapanyag forrása a depóniatelepek és a szennyvíztisztító üzemek által biztosított. Mezőgazdasági jellegű alapanyagok hazánk fejlett mezőgazdaságának, valamint állattartási hagyományának köszönhetően szintén nagy mennyiségben állnak rendelkezésre.

#### a., Depóniatelepek

A hulladéklerakók (depóniatelepek) alapanyag összetétele igen különböző. Részarányuk Magyarországon az európai átlaghoz képest is alacsony: 10% körüli [13]. A szeméttelpeken működő biogázt hasznosító üzemek gyakorlatilag a már lezárt depóniába fúrt függőleges állású csőrendszerből és a telep közelében létesített gáz hasznosítóból, általában gázmotor részlegből állnak (5. ábra) [10].



5. ábra Gázutak gyűjtőcsomója egy működő depóniagáz telepen (Forrás: Saját kép)



### *b., Szennyvíztelepek*

Az Európai Unió átlagához képest Magyarországon arányaiban több szennyvíziszap alapú biogáz üzem működik. A 2009-es adatok szerint a szennyvíz alapú biogáz termelés az össztermelés 34%-át adja [13]. Magyarországon már az ezredfordulón közel 20 szennyvíztelepen történt biogáz előállítás [14].



6. ábra Függőleges elrendezésű rothasztó torony egy szennyvíztelepen (Forrás: Saját kép)

A szennyvízből nyert biogáz termelésének technológiája a depóniagáz kinyerésének technológiájától jelentősen eltér. A fermentációs körülményeket nem a földön keletkező hulladékupac belső „természetes” kialakítása biztosítja, hanem a szennyvíztelepeken működő magas elrendezésű anaerob rothasztó tornyok (6. ábra). Szubsztrátuma főként a telepre érkező szennyvíziszap. A fermentálandó alapanyag két részből tevődik össze: a telepre érkező friss iszapból és a biológiai tisztításon már átesett fölös iszapból. A biogáz hozam növelését a szennyvíziszapra jellemző úgynevezett fonalásodás kialakulását megakadályozó ultrahangos kezeléssel, vagy új mechanikus aprítási technológiákkal igyekeznek biztosítani. Napjainkban a szennyvíztisztító üzemekben a rothasztási hatásfok növelése érdekében egyre több helyen jelennek meg iszapkezelő gépek. A hatékonyságot növelő berendezések a mezőgazdasági alapú üzemek technológiai sorrendjébe is kívánkoznak.

### *c., Mezőgazdasági alapanyaggal üzemelő biogáz üzemek*

Az Európai Unión belül, a mezőgazdasági alapanyagra épülő biogáz üzemek termelése az összes biogáz termelés több mint 60%-át teszik ki [13]. Magyarországon is ezen üzemtípusok terjedtek el leginkább. Előfordul a tisztán növényi és élelmiszeripari melléktermékre (pl.: Kaposvár – Magyar Cukor Zrt., Kecskemét – Pilze–Nagy Kft., 7. ábra) vagy állati eredetű trágya felhasználására (Pl.: Nyírbátor – Bátortrade Kft., Pusztahencse – Mil–Power Kft.) épülő üzem is. Az üzemek méretét általában a megtermelt gázból nyerhető, gázmotorokban előállított elektromos áram mennyisége

jellemzi. Ez alapján gyakori a 0,2–1 MW-os (gázmotor(ok)kal rendelkező) üzemméret. A legnagyobb hazai a 2011-ben átadott szarvasi biogáz üzem, mely 4,2 MW elektromos áramkapacitással és a hozzá kapcsolódó hasonló mértékű hőenergiával bír [15].

A jelentős beruházási költségek miatt a nagyobb kapacitású 1–4 MW teljesítményű üzemek térülnek meg gyorsabban. Ugyanakkor kb. 2 MW felett a szükséges alapanyag mennyisége helyben nehezen biztosítható. Kellő mennyiségű alapanyag hiányában pedig az üzem nem tud teljes kihasználtsággal működni.



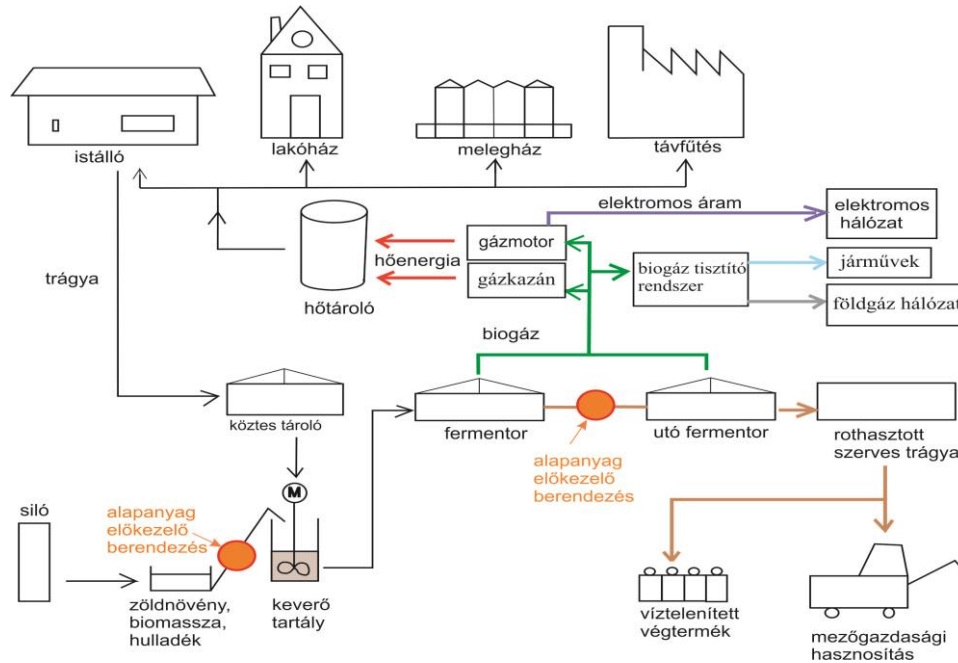
7. ábra Mezőgazdasági alapanyaggal üzemelő, lapos elrendezésű biogáz üzem  
Kecskemét – Pilze-Nagy Kft. (Forrás: Saját kép)

A mezőgazdasági szubsztrátummal működő biogáz üzemek a fermentáció beindításához szennyvíz iszapot használnak oltóiszapként (pl.: dömsödi biogáz üzem – ELMIB Zrt.). Az üzemeltetők egybehangzó véleménye, hogy a megfelelően kifejlődött baktériumkultúra állandóságához javasolt az állandó receptúra. A szubsztrátum összetevőjét a helyben adódó lehetőségek és a beadagolásra váró anyagok szervesanyag-összetétele befolyásolja. Ez abból adódik, hogy a fejlődő biogáz mennyisége nagyban függ például a szén–nitrogén (C/N) aránytól, melynek optimális értéke 18–28 között van. [16] Egyre kevésbé jellemző a tisztán egy alapanyagra épülő fermentáció, helyette a többféle alapanyagú kofermentáció terjed rohamosan, mellyel kiválóan növelhető a gázkihozatal mértéke [8].

A stabil, kiszámítható szubsztrátum, hígtrágya vagy szennyvíziszap mennyiséghez a saját állattartótelep és az üzemhez tartozó földterület nyújthat kellő biztonságot. Ennek hiányában a biogáz üzem kiszolgáltatott az időszakosan beszerezhető alapanyagok kínálatának, rákényszerül az időről-időre változó összetételű szubsztrátum fermentálására.

A 8. ábra ismerteti egy mezőgazdasági alapanyagú biogáz telep sematikus technológiai folyamatát, főbb állomásait és berendezéseit. Az állattenyésztésből és a növénytermesztésből keletkező szerves „hulladékok” tárolása külön – külön történik. Keveréssel, darálással végzett homogenizálásukat követően kerülnek az alapanyagok a rothasztóba. Az alapanyag előkezelése történhet a rothasztó előtti nyersanyag és/vagy a két rothasztó közötti fermentlé esetében is. A fermentorok száma a lehetőségeknek megfelelően növelhető és sorba kötve különböző hőfokra állítva alkalmazható

(termofil és/vagy mezofil) a hatásfok növelése érdekében. A fermentorban képződött gáz többféleképpen hasznosítható. A gépházba érve gázmotor segítségével hő- és villamosenergiává alakul. A hőenergiát hasznosíthatják az üzem berendezései (fermentorok fűtése), a gazdálkodó telep egységei, esetleg egy közeli lakótelep révén. A villamosenergia a törvényben előírt módon, kötelező átvételi áron, előzetesen kötött szerződés alapján az országos rendszerbe kerül.



8. ábra Biogáz-telep sematikus vázlatja [17]

Másik hasznosítási mód a biogáz kazánban történő elégetése. A gázkazán által előállított hőenergia további felhasználásra kerül. Lehetőség adódik a biogáz vezetékes földgázrendszerbe történő táplálására is. A vezetékes földgáz 98–99%-os metántartalommal rendelkezik. A nyers biogázban a metán kb. 55–70% tartalommal van jelen. A gáz többi, jelentős részét a széndioxid képezi. [8] Ennek tisztítására napjainkban már többfajta korszerű, versenyképes áron kivitelezhető és hatékonyan alkalmazható eljárás létezik. A tisztítást követően palackozva a gépjárművek üzemanyagaként is hasznosítható.

A fermentorból elvezetésre kerülő végtermék a fermentlé, ami kitűnő minőségű biotrágya is lehet. Ez egy gyűjtő tározóból kerül értékesítésre, vagy a trágyázási időszaknak megfelelően visszakerülhet a gazdálkodó mezőgazdasági területeire, mint értékes mezőgazdasági tápanyag.

### 2.1.3. Magyarországi üzemek általános problémái napjainkban

A magyarországi biogáz üzem körképének készítése során elsődleges problémaként a kiszámíthatatlanság, a tervezhetőség hiányával lehet találkozni. Egy üzem tervezésekor számításba vett alapanyagár (pl.: silókukorica ára) sokszor már a kivitelezési időszak alatt is változhat. Az áram

átvételét és a tevékenységet támogató szabályozó KÁT rendszer megszűnt. Az ezt felváltani szándékozó tervezett megújuló és alternatív energiaforrásokból előállított hő- és villamosenergia-átvételi támogatási rendszer (METÁR) nem jött még létre, és részletei jelenleg még nagyvonalakban sem ismertek. A „zöldáram” átvételi ára az EU-s átlag alig 2/3-a, a németországi árak pedig a felét sem éri el [18].

A helyi specialitást figyelembe vevő különböző modulokból álló standard technológiák is sokszor utólagos fejlesztésre szorulnak. A költséges, bizonytalan kimenetelű beruházás végére nem marad forrás a műszaki park további fejlesztésére, specifikálására, ami a hatásfok csökkenését eredményezi.

A problémák között felmerül a fermentáció során keletkezett „biotrágya” (fermentlé) hasznosításának kérdésköre. Míg Nyugat-Európában hasznos talajjavító anyagnak számít, addig Magyarországon – egymásnak ellentmondó, párhuzamosan életben lévő szabályozások kapcsán – inkább csak egy újabb “probléma” forrása [19,20].

A rendelkezésre álló technológiák közül a legtöbb üzemben a biogáz kazánban történő elégetésével, vagy gázmotorban előállított értékes elektromos árammal igyekeznek profitot termelni. Ez utóbbinak gyakori megoldatlan kérdése a gázmotor működése során nagy mennyiségben keletkezett hő hasznosítása. Az ország áramtároló kapacitása minimális. Ebből adódik, hogy előre tervezetten kell megadni a nagy bizonytalanságú kapacitással működő, majdani termelt gázmennyiséget. A szerződött érték be nem tartása, az attól való eltérés szankciókkal járhat.

Magyarország szerteágazóan kiépített modern gázvezetékrendszere alkalmas lenne a vezetékes gáz tisztaságúra alakított biogáz fogadására és annak széleskörű használatára. A helyben kitermelhető „zöldgáz” a már kiépített földgázrendszer hálózatba történő juttatása, időszerű és kézenfekvő megoldást kínál a gázhiány problémára.

Ugyanakkor gondot okoz a rendszerbe táplált tisztított biometán előírt minőségének folyamatos ellenőrzése, ami a beadagolóra komoly anyagi terheket ró. Ennek értelmében behatárolt a betáplált biometán mennyiségének gazdaságos mennyisége.

Nyugat Európa egyes országokban már megtörtént a biometán földgáz hálózatba történő betáplálásának törvényi szabályozása, mellyel a folyamat megfelelő keretek között elvégezhető. Ausztriában, Dániában, Franciaországban, Németországban, Hollandiában, Svédországban és Svájcban a feltételét jelentő gáztisztító és gázdúsító technológiák évtizedek óta működnek. [21] Magyarországon ennek kivitelezése hazai törvényi szabályozásra vár.

A járműiparban üzemanyagként használható tisztított, sűrített biometán mintauzem hazánkban Zalaegerszegen működik.

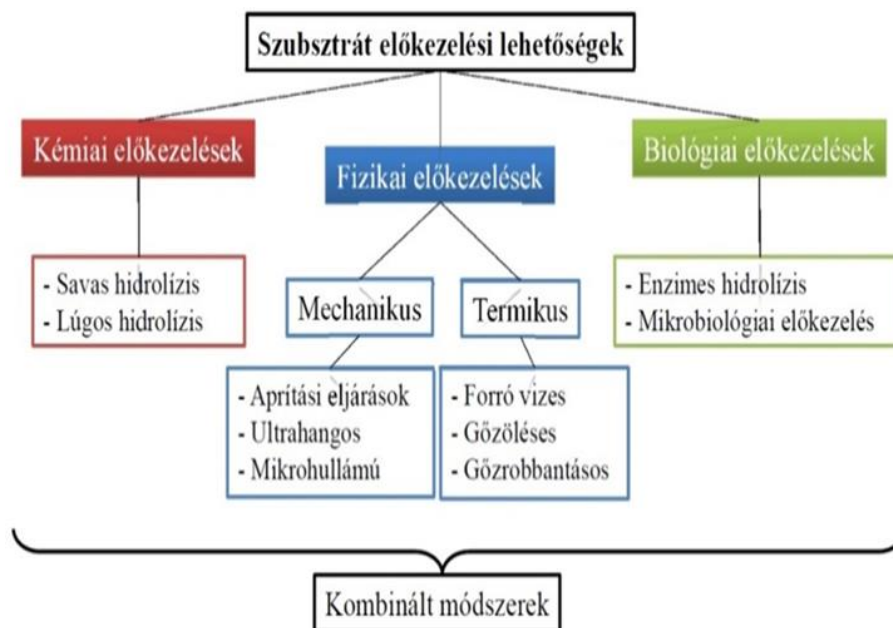
A biogáz témakörben töltött kutatási éveim alatt számos hazai és külföldi biogáz üzemben tettem látogatást. Tapasztalataim alapján megállapíthatom, hogy mezőgazdasági alapanyagot feldolgozó üzemek minimális előkezelési, darálási-darabolási technológiát alkalmaznak a szubsztrátum homogenizálása céljából.

Szennyvíziszap alapú biogáz üzemekben elterjedőben van az ultrahangos kavitáción alapuló aprítási technológia, mint szennyvíziszap előkezelő eljárás. Ehhez hasonló rendszer, kiegészítve még további nyírásos mechanikai hatást alkalmazó géppel létezik Stremben (Ausztria) és Möglingenben (Németország). Magyarországon Dunaharaszttiban és a zalaegerszegi szennyvíztelepen alkalmaznak az üzem technológiai sorába csatolt ultrahangos és mechanikus elven működő gépegységet.

A biogáz üzemek elsősorban kiszámítható gazdaságpolitikát és egyértelmű szabályozást várnak [22]. Ugyanakkor keresik fenntarthatóságuk biztosítását a termelés biztonságos hatékonyságának növelésével.

## 2.2. Biogáz alapanyagok előkezelésének eljárásai

A hidrolízis sebessége meghatározza a gázképződés időbeli lefolyását. A felületfüggő bomlást a szilárd részecskék méretének csökkentésével lehet gyorsítani. Ezt az aprítást a biomassa előkezelése során létrehozhatjuk fizikai, kémiai és biokémiai úton is. Mindegyik kezelési eljárásnak több altípusa létezik, továbbá egymással kombináltan is alkalmazhatók. (9. ábra) Az egyes továbbfejlesztett változatok a sejtfeltárási hatékonyság növelésére törekednek, például a felület roncsolásával, megkarcolásával, felsértésével.



9. ábra Előkezelések csoportosítása [23]

A hatékony és gazdaságos előkezelési eljárásoknak az alábbi követelményeknek kell megfelelniük:

- enzimatisz behatásra megfelelően reagáljon a szubsztrátum,
- a fermentációs organizmusok és hidrolizáló enzimek működésének lehetséges inhibíciójának elkerülése,

- a bevitt energiaigény minimalizálása,
- az alapanyag méretcsökkentési költségigényének redukálása,
- az alapanyag előkezelő reaktorának költségcsökkentése (működtetés, beszerelés stb.),
- a fermentáléban visszamaradó minél kevesebb szerves szárazanyag-tartalom,
- technológiai gépegység esetén minél kisebb fogyasztás, vegyi beavatkozásnál minél kisebb kockázatú kémiai alapanyag.

A különböző eljárások kedvezően hatnak a hidrolízisre, ugyanakkor mindegyiknek van hátránya is. Az egyes kezelések szakirodalomban található eredményeit a vizsgált alapanyag típusának megfelelő fejezetben részletesen ismertetem.

### **2.3. Növényi biomassa előkezelése rothasztási hatásfok növelése céljából**

A biomassa egy adott pillanatban, valamely élettérben jelenlevő élőlények és szerves anyagok: a növényzet (fitomassa), az állatvilág (zoomassa), az elhalt szervezetek, valamint a szerves hulladék összessége [24]. Az alábbi fejezetekben elsősorban a növényi alapú biomassa jellemzői, bomlási körülményei és előkezelésük biogáz hozamra tett hatásai kerülnek bemutatásra.

#### *2.3.1. A lignocellulóz bomlási jellemzői*

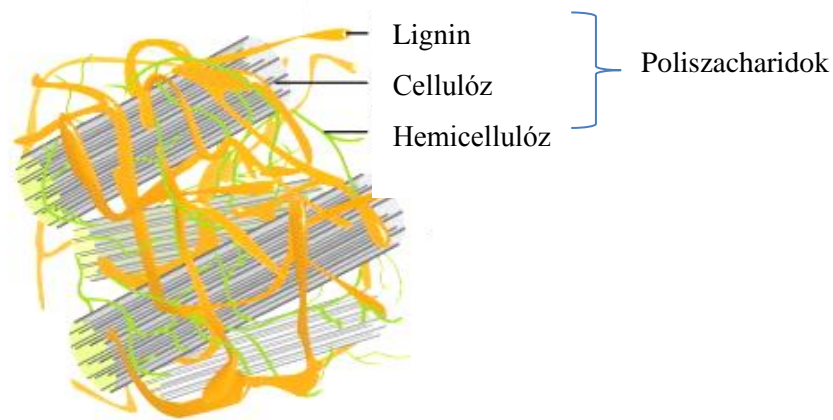
A mezőgazdasági biogáz előállítás olyan növénytípus termesztésével tehető hatékonyá, amely igen gyorsan nő és a sejtfalának anyagai között prominensen megjelenik az energiában gazdag lignocellulóz. A növényi biomassa az élő növényi és a növényi eredetű szerves anyag tömegességben kifejezett mennyisége.

A mezőgazdaságban számottevő a hasznosítatlan, nagy százalékban cellulózt tartalmazó (búzaszalma, ~60–70%) szerves hulladék mennyisége. Előkezelések nélkül a cellulóz enzimes hozzáférhetősége az ellenálló lignocellulóz struktúra miatt igen alacsony, a fermentációban résztvevő mikroorganizmusok számára nehezen emészthető. Ezért fontos a biogáz hozam növekedéséhez szükséges lignocellulóz komplex struktúrájának mechanikai úton történő megbontása.

A biomassa fő alkotóeleme a lignocellulóz. A lignocellulóz cellulóz és hemicellulóz poliszacharidokból, valamint az összetartó erős vázszerkezetből, a ligninből áll [25](10. ábra). A lignocellulóz három fő összetevő különbözősége miatt heterogén összetételű, jellemzően polimorf – kristályos és amorf –, makrostrukturális. Egyes tulajdonságai függenek a polimerizáció fokától, a felülettől és a lignin eloszlástól.

A cellulóz (hosszú D-glükóz láncok egységéből és Béta-1,4-es glikozid kötésekkel felépülő poliszacharid) a magasabb rendű növényekben a vázanyag szerepét tölti be. A növényi sejtfal primer és szekunder részében is található. A cellulóz törzsek együtt úgynevezett cellulóz rostokat vagy

cellulóz kötegeket alkotnak. A lignocellulóz fő alkotóeleme stabil, erős képződmény kb. 14 MJ/kg fűtőértékkel.

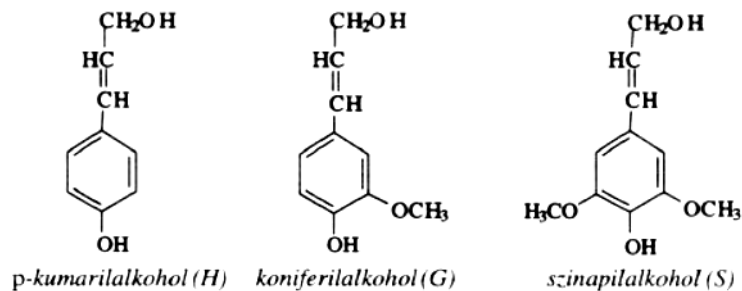


10. ábra A lignocellulóz felépítése (Forrás: R. Van Acker, V. Boerjan, R. Vanholme, 2010.)

A *hemicellulóz* a cellulózon kívüli összes kisebb molekula tömegű poliszacharidok gyűjtőneve. Öt (D-xylóz és L-arabinóz) és hat (D-galaktóz, D-glükóz, és D-mannóz) szénatomos cukrokból, valamint uronsavakból épülnek fel. Amorf szerkezete miatt viszonylag könnyen hidrolizálható. A hemicellulóz között a pentózok a leggyakoribb és legnagyobb mennyiségben előfordulók, de a hexózok is megtalálhatók közöttük. Ide soroljuk még továbbá az olyan cellulózhoz hasomló felépítésű poliszacharidokat is, amelyek lényegesen kisebb molekula tömeggel rendelkeznek, mint a cellulóz. [26] Jellemző rájuk a különböző fokú oldhatóság. A hemicellulóz vegyületek oldhatósága csökkenő sorrendben: mannóz, xilóz, glükóz, arabinóz és galaktóz. Oldhatóságuk a hőmérséklettel együtt növekszik. A hemicellulóz vegyületek vízbe történő szolubilizálása semleges közegben kb. 180 °C-on kezdődik. A komponensek szolubilizálása függ még továbbá a nedvességtartalomtól és a pH értéktől is [27].

A *lignin* a növényvilág legnagyobb mennyiségű szerves, aromás vegyülete. [28] A lombos fa lignintartalma 20% körüli, a fenyőfélék lignintartalma 30% körüli. Összetétele fafajtól függően különböző: széntartalma 58–60%, hidrogéntartalma 6,1–6,5%, oxigéntartalma 29–35% között változik. Alap építőeleme a fenil-propán ( $C_6+C_3=C_9$ ) váz. Három alkoholból, p-kumarilalkoholból (H-), koniferilalkoholból (G-guaiacyl) és szinapilalkoholból (S-sziringil) szintetizálódik a bioszintézis során (11. ábra). A cellulóz molekulákhoz kapcsolódó lignin molekuláknak szilárdító szerepük van a növényzet háromdimenziós mátrix szerkezetében. A lignin térhálós szerkezetű C–C kötésekben áll. Leggyakoribb kötéstípusa ezek közül a  $\beta$ -akril éterkötés. [29] Nagy molekulatömeggel és körülbelül 20 MJ/kg fűtőértékkel rendelkezik [30].





11. ábra A lignin építőelemei (Forrás: Dr. Molnár S. et al. 2000.)

A lignocellulózban a hasznosítható cukrok kötött formában vannak jelen, a cellulóz bontását a lignin és a hemicellulóz polimer mátrixának kötése nehezítik. A nagy lignintartalom a sejtfa ellenálló képességének növelését vonja maga után.

A cellulóz jelentős, körülbelül 2/3 része kristályos, erős szerkezetet alkot kötegelt makrofibrilláival. [31] Ha magas a kristályosodási arány, akkor a cellulóz a hidrolizáló enzimek számára nehezebben hozzáférhető, vízzáró struktúrája ellenállóbb a mikrobiológiai és oxidatív behatásoknak. A szerkezet megbontásának vizsgálatára a széles körű előkezelésekről és eljárási módokról, jelentős számú tanulmány készült [27,32,33].

A természetes cellulóz esetében a nedvesítés egyértelműen felületnövekedéssel jár együtt. Fan, Lee és Beardmore [34] összefüggést mutatott ki a vízzel duzzasztott cellulóz kristályok előkezelésének hatásosságára, amikor vizes golyós malmos aprító berendezésen vizsgálta a cellulóz kristálybontási lehetőségét.

Kapcsolat van a hozzáférhető cellulóz felület és az enzimes emészthetőség között. A lignin enzimes bontása után nagyobb felületű hemicellulóz válik szabaddá, ami növeli a degradációt, ami összefüggésben van a kristályosodási fokkal. Ugyanakkor Wyman [35] a felületnövelést még önmagában nem tekinti emészthetőségi tényezőnek. A fajlagos felületnövekedés ugyanakkor egyértelműen növeli a nedvesedési hatékonyságot is [36].

Az aprítási előkezeléseknek jelentős hatásuk van a degradációra: az emésztési időt 23–59%-ban csökkentik, míg a biogáz hozamot 5–25% között növelik. [27] Zeng és társai [37] kukoricaszárral végzett kísérletei alátámasztották, hogy a fajlagos felületnöveléssel a degradáció hatékonyabb. A vizsgálat során 53–75  $\mu\text{m}$  szemcsenagyságú szubsztrátum 1,5-ször nagyobb lebomlást produkált, mint a 425–710  $\mu\text{m}$  nagyságú.

A vízzel történő előkezelések növelik a cellulóz rostok pólusait, megnövelve ezzel a hozzáférhető felületet is. A szárítás – a kapillárisok összeszűkülése miatt –, vissza nem fordítható kedvezőtlen hatást fejthet ki a degradáció szempontjából.

A bontható felület az enzimatikus hidrolízis során is változik. A degradáció elején a rothasztás üteme igen magas, majd sebessége csökken a későbbi szakaszban. Kimutatták, hogy a hidrolízis



későbbi szakaszaiban a csökkenés elsősorban nem a felület csökkenése miatt következik be. A problémát a cellulóz kristályos részének hidrolízise jelenti. Ezért kell számítani csökkenő rátára az amorf cellulóz rész hidrolízisét követő további hidrolízise során [37].

A ligninbontás nem egyedüli hidrolizációs tényező, mert a lignocellulóz szál delignifikációja során a hemicellulóz is vele együtt kerül bontásra. A lignocellulóz előkezelése következtében az oldott ligninben is keletkeznek gátló tényezők. A különböző lignin struktúráknak megfelelően az inhibitorok lehetnek cellulázok, xilánok, glükodiázok. A lignin eloszlás és összetétele fontosabb, mint a lignin koncentrációja. A nagyobb guaialacyl lignin mennyiséget tartalmazó lágy lombosok vagy fenyők makacsabbak a hidrolízis során, mint a keményfák, amik guailacyl és sziringil lignint egyformán tartalmaznak. Ramos és társai [38] vonták le kísérleteik során azt a következtetést, hogy a guaialacyl lignin kevésbé bontható, mint a sziringil lignin.

Mooney és Mansfield [39] kutatásai rámutattak arra is, hogy a felületnövekedést nem, vagy csak kis mértékben gátolja a lignin. A lignin eltávolítása ugyanakkor a degradációs folyamat sebességét, az emészthetőséget növeli.

### 2.3.2. *Növényi eredetű biomassza termikus, kémiai és biológiai előkezelési eljárásai*

E fejezetekben áttekintő jelleggel ismertetem a fizikai előkezelések közül a termikust, majd a kémiai és a biológiai előkezeléseket. A fizikai előkezelések másik nagy csoportja – a mechanikus elven működő technológia –, a 2.3.3. fejezetben kerül bővebben ismertetésre.

#### *a., A termikus előkezelési eljárás*

A termikus fizikai előkezelés során megemelt hőmérséklet és nyomás lehetővé teszi a folyékony fázis fenntartását, ami az enzimes hidrolízis viszonylag lassú folyamatainak felgyorsítását eredményezi. A biológiai hidrolízishez képest a legfontosabb különbség, hogy a hőbontás kedvező irányba befolyásolja a katalizáló enzim aktiválási energiáját és a reakció sebességét. Ha a hőmérséklet 150–180 °C körüli értéket vesz fel, akkor a lignocellulóz biomassza részei közül a hemicellulóz, majd röviddel utána a lignin szolubilizációja indul meg [40,41].

A hemicellulóz fő váza és láncolatának kialakítása, összetétele, meghatározza annak savas és lúgos stabilitását. A hemicellulóz xilán összetevője termikusan kevésbé stabil, mint a glucomannan része. 180 °C felett beindul a feltehetőleg exoterm szolubilizációja a hemicellulózoknak. [42] A termikus eljárás alatt hidrolizál és savasodik a biomassza. Ezek az „*in situ*” savak katalizáló hatásúak a hemicellulóz szolubilizációjánál. [43] A termikus bontás folyamán ugyanakkor – az anyagtól függően kb. 230 °C-tól kezdve –, nem kívánt degradációs folyamatok is beindulnak, amelyeket elsősorban a monomerek bomlására lehet visszavezetni. Az enzimes hidrolízist legerősebben gátló hatást a fenolok, a furfuraldehidek és a hidroxil-vajsav fejtik ki. Ezért az előkezelésre a 170 és 220 °C közötti

hőmérséklet-tartomány látszik kedvezőnek [44,45,46]. 250 °C felett kerülni kell az előkezelést, mert beindul a nem kívánt pirolízis.

A termikus előkezelési eljárás a *gőz előkezelés* és a *gőzrobbantás*. A magas, 240 °C körüli néhány percre tartó beavatkozás nagy nyomáson történik. Az eljárás után gőz szabadul fel, a biomassa gyorsan kihűl. Mindkét eljárásnál cél a hemicellulóz szolubilizációja.

A *gőzrobbantás* végén gyors nyomásesés és hőmérséklet csökkenés következik be, melynek hatására a biomasszában levő víz felrobban. E robbanás megnöveli a biomassa, baktériumok általi emészthetőségét [47].

A *gőzkezelés* során keletkezett savak a hemicellulóz további hidrolízisét katalizálják. Az eljárást meghatározza a beavatkozási idő. Ezt befolyásolja a biomassa nedvességtartalma. Minél magasabb a nedvességtartalom annál hosszabb kezelési időre van szükség [47].

A gőz előkezelésnél keletkező járulékos vegyületek (furfurol és oldható fenolos vegyületek) gátolják az etanol fermentációt és a metántermelést, ugyanakkor a metántermelő baktériumok egy bizonyos mennyiségű gátló vegyülethez még képesek alkalmazkodni. Kísérletek igazolják, hogy alacsony, 2 bar nyomáson ( $t = 120\text{ °C}$ ) történő 300 percre tartó előkezelésnek a búzaszalma összetételére tett hatása nem volt jelentős [48].

A gőzkezelés inhibitor hatásának kiküszöbölésére alkalmazzák, a szintén termikus csoportba tartozó *forró vizes* kezelést. Ennek feltétele, hogy az anyag pH értékét 4 és 7 között kell tartani [49].

A forró vizes előkezelés előnyösebb, mert a gátló tényezők közül a kondenzáció és a furfurol képződés nem jelentős. A hidrolízis 2–5-szörös növekedést mutatott a beavatkozás során [50].

#### *b., Kémiai előkezelési eljárás (savas és lúgos)*

A *kémiai – savas beavatkozás* szobahőmérsékleten, erős vagy híg savas koncentrációban, magas hőmérsékleten (híg savas) történik. A savas előkezelés szublimációja során a lignin gyorsan kondenzál és lecsapódik. A hemicellulóz szolubilizációja és a szolubilizált lignin lecsapódás sokkal erőteljesebb az erős savas előkezelés esetében, mint a híg savas előkezelés esetén. [51] A szolubilizálás sikeres így a cellulóz bontás eredményes a savas kezelés során. Ugyanakkor nagy a kockázat az etanol képzés során, mert sok szénatomot veszthet az eljárás. A kondenzációs kicsapódás nem kívánt mellékhatás, mert csökkenti az emészthetőséget. Az erős savas kezelés etanol gyártás során nem javasolt, mert a folyamat alatt gátló tényezők képződhetnek. Xiao és Clarkson a hígsavas kezelést tartják célravezetőbbnek, főként a metángyártásban. [52].

A *kémiai-lúgos beavatkozás* NaOH, KOH,  $\text{Ca(OH)}_2$ , valamint ammóniával ( $\text{NH}_3$ ) történő előkezelés során a hidrazin és a vízmentes ammónia a biomassa duzzadását okozza. Ez megnöveli a biomassa belső felületét, egyúttal csökkentve a polimerizálódás és a cellulóz kristályosodási fokát. Lúg hatására a lignin szerkezete fellazul, szétválasztva azt más szénhidrátoktól a biomasszában. A baktériumok számára a szénhidrátok a csökkent molekulaméret által elérhetőbbek a heterogén mátrixban [53].

A NaOH alkalmazása optimális az előkezelő anyagok közül. 1,6 g/l szobahőmérsékleten történő oldat alkalmazásával az illékony szilárd anyagok 40–90%-a eltávolítható. Pavlovstathis és Gossett [54] a metán mennyiségének 100%-os növekedésével igazolták a lúgos kezelés hatását.

Az előkezelések elvégezhetők szobahőmérsékleten, hosszabb ideig tartó, magas lúgkoncentráció mellett is. A 24 órán keresztül 10%-os ammóniával előkezelt alapanyag vizsgálata során a szójaszalma hemicellulóz tartalma 41,45%-ra, a lignin tartalma pedig 30,16%-ra csökkent [55]. Az eljárás alacsony lignintartalommal bíró – például mezőgazdasági hulladék – esetén jelentős. Ugyanakkor faanyagoknál az eljárás hatékonysága kisebb mértékű [56].

### *c., Biológiai előkezelési eljárás*

A mikrobiológiai előkezelés célja, olyan mikroorganizmusok alkalmazása, melyek képesek a növényi szerkezetben fellelhető ellenálló cellulóz, lignocellulóz és lignines struktúra megbontására.

Még jelenleg is keveset tudunk a fermentorban levő mikroszkopikus együttélési szokásokról. A folyamatot kutató kísérletek célja, hogy a kívülről bevitt degradációt elősegítő mikroorganizmus a fermentációban részt vevő baktériumok életét segítse. Ellenkező esetben a közösség kiközösíti a bevitt elemet, ami huzamosabb ideig nem tud az életközösségben fennmaradni.

A biológiai beavatkozás célját tekintve két lehetőség van. Az egyik, a polimerek lebontását elősegítő mikrobákkal növelni a fermentáció hatékonyságát, a másik, a lassú metanogén baktériumok tevékenységének, intenzitásának növelése.

Elviekben a metanogén baktériumok rendszerbe juttatása is megoldást hozhat a biogáz termelés növelésére, gyakorlatban ugyanakkor az obligát anaerob baktériumok szigorú életfeltételei miatt ezek tenyésztése és szállítása igen költséges.

A hidrolízis, mint a rothasztási folyamat első lépése, igen meghatározó a további lépések hatékonyságát tekintve. A beoltott cellulózbontó baktériumok alkalmazkodóbbak a környezeti baktérium telephez, továbbá a célnak megfelelően elkülönített tartályba visszajutathatók. Nagyüzemi körülmények között akár 20%-os biogáz hozamnövekedést is el lehet így érni. [8]

Közvetlenül a hidrogénképződési szakaszba is be lehet avatkozni olyan törzsek beoltásával, melyek a hidrogénképződést jelentősen fokozzák. Prof. Kovács Kornél vezetésével a Szegedi Egyetem mikrobiológiai tanszékének munkatársai, kutatásuk során találtak a hidrogén termelés fokozására alkalmas, az anaerob mikrobiológia részére befogadó törzseket. Ezek az acetogenezis szakaszát aktivizálva kész hidrogént állítanak elő a metanogén baktériumoknak. Az intenzifikálódásukkal tehát a fermentáció utolsó szakaszát jelentősen meggyorsítják. Ezen törzsek mind mezofil, mind termofil körülmények közötti adaptálásával az egységnyi idő alatt termelt biogáz mennyisége megduplázható. A sertés-, szarvasmarha-, szennyvíztelepi és kommunális szilárd hulladékon már bizonyított eredményességű eljárás technológiája egyszerű, olcsó és könnyen előállítható [57].

### 2.3.3. A növényi eredetű biomassza mechanikus előkezelési eljárásai

Bár az aprító berendezések száma jelentős, többségét mégsem alkalmazzák mezőgazdasági biogáz üzem alapanyagának aprítására. A széles körben elterjedt aprítóberendezések e célra történő kiválasztásakor figyelembe kell venni, a beadagolandó hulladék nedvességtartalmát, hőmérsékletét, keménységét, darabosságát és szemcseméret eloszlását. Fontos szempont még, hogy az alapanyag igényel-e további, egyéb kezelést illetve a berendezéssel mekkora méretcsökkenést (aprítási fok) kívánunk elérni. A fa és a növényi hulladékok a közepesen kemény, lágy, rostos, rugalmas anyagok csoportjába tartoznak. Ezek durvaaprítása történhet kalapácmalmok, vágómalmok, vágóművek alkalmazásával. Finomaprítása kalapácmalmok, vágómalmok, vágóművek, ütőcsapos malmok, koptatómalmok berendezéseiben történhet. [58] A finom aprítási eljárások közül az a megfelelő technológia, amivel nagyobb fajlagos felület érhető el és az alapanyag baktériumok általi hozzáférhetősége növekszik.

A fizikai hatáson alapuló előkezelési eljárásokat és azok alapanyagra tett hatásait mutatja be a 2. táblázat [55].

2. táblázat A fizikai hatáson alapuló előkezelések összefoglalása

Eljárás	Folyamatok	Alkalmazása	A biomasszára gyakorolt lehetséges hatások	Megjegyzések	Hivatkozások
Maró, őrlő	Golyós őrlés	Etanol	1. felület és pórusnövekedés  2. cellulóz kristályrács csökkentése  3. polimerizációs fok csökkentése	1. A legtöbb eljárás nagy energiaigényű  2. A legtöbb eljárás nem távolítja el a lignint  3. Ipari alkalmazása nehezen megoldott  4. Vegyi anyag alkalmazására nincs szükség	[59], [60]
	Kéttárcsás őrlés				[61]
	Kalapácsos őrlés				
	Kolloid őrlés				
	Vibro energiás marás, őrlés				
Sugárzásos	Gammasugárzás	Etanol és biogáz			[62], [63]
	Elektronsugárzás				[64]
	Mikrohullámú sugárzás				
Egyéb	Hidrotermikus	Etanol és biogáz			[65], [41]
	Nagy nyomású gőzös				
	Expanziós				
	Extrudálásos				
	Pirolízises				

A maró-őrlő gépek közül a kolloid malom csak nedves szubsztrátum kezelésére alkalmas. Az extruder berendezés, a tárcsás és a kalapácsos malom többnyire száraz anyag aprítását teszik lehetővé. A golyósmalom alkalmazható száraz és nedves anyag esetében is. A technológia alkalmazásával nő a fermentációs felület és csökken a kristályosodási fok. A Solka Flocc golyós őrlő berendezés a

kristályosodási fokot 74,2%-ról 4,9%-ra csökkenti. [34] Jim és Chen [66] végzett gőzrobbantásos kísérletet 5–8 cm nagyságúra vágott rizsszalmával 4–5 percig 180, 195, 210, 220 °C-on. Ezt a gőzzel kezelt anyagot tovább kezelték szuper finom fluidágyas és sugárhajtású őrlő berendezésben. Az így elért legfinomabb szemcseméretre csökkentett szalma hozta a legnagyobb gázhozamot.

Kim és Holtzaple [67] kísérletei abba az irányba mutattak, hogy különböző típusú eljárásokat együtt végezzenek el. Például rizsszalma esetén a marási eljárás mellett a hőmérséklet növelése és a 2%-os ammóniás kezelés együtt mutatott jelentős gázhozam növekedést.

Az őrlés-nyírás elvén működő hollandi törővel is kísérleteztek Írországban, alapanyag aprítás céljából. A kísérletet 580 fordulat/min sebességgel forgó Hollandi törővel aprított szubsztrátummal végezték. A gépben a pengék és barázdák vágó mozdulatokat végeznek, melyek a nagy nyomással és sebességgel beérkező növényzetet összetörik. Silózott kukoricával 29%-os biogáz többlet hozamot értek el [68]. Tedesco, Benyounis és Olabi ír kutatók 2012-ben az ország tengerpartjain gyűjtött algákat kezelték szintén ebben a berendezésben, majd megvizsgálták az anaerob fermentáció szempontjából. Az eredmény, az algák kismértékű lignocellulóz tartalma miatt, az átlagos érték felett mintegy 70% körüli extra biogáz többletet mutatott [69].

A folyadéknyíró technológiák hatékonysága függ a folyadékáramtól és a nyomástól, mert célja a sejtek és iszaplehek tiszta mechanikai erő hatására bekövetkező szétszakítása. Jelentős eredményeket (16 –110%-os növekedést) főként eleven iszapos szubsztrátum estében értek el. [70] Használata költséges.

A golyósmalom használata is energiaigényes. Ennek csökkentésére, és a hatékonyság növelésére ajánlatos a berendezésben elhelyezett, üreges szálú töltet alkalmazása. További hátránya, hogy a lignin eltávolítására képtelen, ami továbbra is gátolja a baktériumok hatékony hozzáférését a polimerekhez [71].

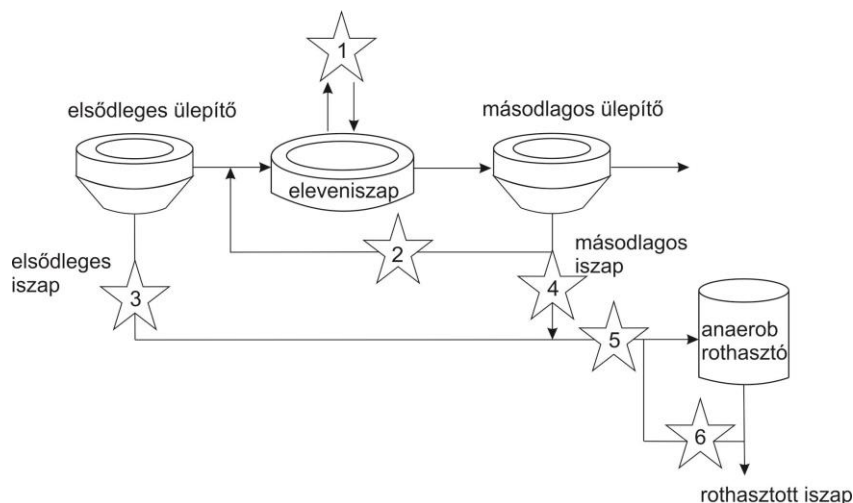
A búzaszalma ultrahangos kezelésének hatásait vizsgálva megállapították, hogy másodlagos sejtfaának első rétegében jelentős fibrilláció megy végbe. Rostdarabolódás és duzzadás is megfigyelhető, javul a ligninmentesítés és az őrlésfok jelentősen változik [72].

#### **2.4. A szennyvíziszap mechanikai előkezelése rothasztási határfok növelése céljából**

A szennyvíz olyan szennyezőanyagokat tartalmazó hulladékvíz, mely emberi használatból származik. A szennyvizek típusai közé tartozik az ipari, a háztartási, az intézményi, a mezőgazdasági, a kommunális és a csapadékvíz is. Összetétele ennek megfelelően változatos. A szennyvízre épülő üzemek iszapja is biomassza. A szennyvíziszapból termelt gáz a szennyvízgáz, amely a biomassza nyersanyagok közül a legmagasabb metán tartalommal rendelkezik. Az alábbi fejezetekben a szennyvíztisztítás folyamata, jellemzői és a különböző előkezelések szennyvízgáz hozamra tett hatásai kerülnek bemutatásra.

### 2.4.1. Szennyvíztelepek működése, az iszapkezelés folyamata

A szennyvíztelepre bekerülő szennyvíz szerves anyagának a sejtekbe beépült része ülepítéssel eltávolítható. Az előülepitőkben leválasztásra kerülő nyersiszap, valamint a biológiai fokozatok fölősiszapja betáplálásra kerül az iszapkezelés műtárgyaiba. A mechanikailag eltávolított szennyezés után a még magas szerves és lebegő anyagtartalmú szennyvizet mesterséges vagy természetes biológiai folyamatok révén tisztítják tovább. A biológiai szennyvíztisztítás a természet élővizeiben és a talajban is lejátszódó biokémiai reakciókon alapul. Az üzemben telepített rothasztó toronyban a bomlást végző mikroorganizmusok tevékenységéhez szükséges feltételeket az emberi beavatkozás biztosítja. A szennyvíztelepeken a természetes és mesterséges folyamatok alapjai keverednek. A mesterséges berendezések célja, hogy a reakciók kisebb helyen és gyorsabban zajlódjanak le. A biológiai szennyvíztisztítás során keletkező visszamaradó termék aerob és anaerob mikroszervezetei a szennyvízben található szerves anyagokat bontják le. Lebontási termékeik kis molekulájú stabil vegyületek, mint például a szén-dioxid, metán, kén-hidrogén, ammónia stb. A szennyvíztisztítás anaerob rothasztási lépésében biogáz keletkezik. A rothasztókba kerülő iszapot előzetesen sűríteni kell, hiszen a reaktortérfogat állandó, így a sűrűbb rátáplált iszap nagyobb biomassza tömeget jelent, amely több gáz termelésére képes. A sűrítési eljárás során a kiindulási pontot a kb. 0,5%-os szárazanyag tartalmú eleveniszap jelenti, amelyet 5–7%-osra sűrítenek a rátápláláshoz. A rothasztók iszapja – elvétel után –, ismételten átmegy valamely sűrítési technológiai lépésen, így az iszapkezelési technológia végterméke rothasztás után 20–30%-os vagy akár 40%-os szárazanyag tartalmú, amely már gazdaságosabban szállítható és deponálható. Sűrítési-víztelenítési célra többféle technológia használható, amelyek hatékonyságukban különböznek egymástól. A gravitációs iszapsűrítőt és a sűrítő asztalt a rothasztóba adagolt iszap esetében (tehát még anaerob rothasztás előtt), a szalagprést, a kamrás szűrőprést és a víztelenítő centrifugát pedig általában a rothasztóból elvett iszap esetében alkalmazzák. Ezek egymással kombinálhatóak, mert a megfelelő mértékű sűrítés több lépcsőben is elérhető. Minden lépcsőben adagolnak víztelenítést/sűrítést segítő polielektrolitot (flokkulálószer, rendszerint poli-akrilamid típusú vízdoldható kopolimerek), vagy más polimert (szervetlen vegyszer, főként kalcium- és vasvegyület).



12. ábra Iszapkezelési technológiák elhelyezkedése a szennyvíztisztítás folyamatában [73]

1. az eleveliszap egyidejű kezelése, 2. egyidejű kezelés az eleveliszap recirkulációs ágában, 3. primer iszap kezelése az anaerob rothasztás előtt, 4. szekunder iszap előkezelése az anaerob rothasztás előtt, 5. kevert iszap előkezelése az anaerob rothasztás előtt, 6. a rothasztóból kapott biotrágya cirkulációs ágában történő előkezelés

A tisztítás – mint fő tevékenységi cél – műveletei során keletkezett szerves anyagban gazdag primer és szekunder főlös iszap további rothasztása, a szennyvíztelepek biogáz előállításának alapanyaga. A víztisztítás és melléktermékéből származó zöld energia előállítása igényli az összekapcsolt technológiai sorrend optimális kialakítását. A szubsztrátumot ért előkezelések célja a rothasztási hatásfok növelése. Az erre irányuló kutatások során már beigazolt módszerek közül, a gyakorlatban is alkalmaznak kísérleti vagy már tartósan beépített eljárást.

A szennyvíztisztítás technológiai folyamatába illesztett előkezelő eljárásokat a tisztítási folyamat legkülönbözőbb szakaszába szokták beépíteni. Erre mutat példát a 12. ábra, ahol a sorszámokkal jelölt csillag elemek utalnak az iszap előkezelési berendezésre. Az 1. és 2. pontok esetében a levegőztető medencébe és a szekunder iszap recirkulációs ágába elhelyezett beavatkozás, a szennyvíz mennyiségének és hatékonyabb degradációjának céljából történik [74]. A primer, a szekunder és a kettejük kevert iszapjának ágába (5.) is behelyezhető egy-egy anyagfeldolgozó technológia. A 3. számmal jelölt helyen is eredményes a beavatkozás, mert a primer iszap önmagában is könnyen, jól bontható alapanyagként minősül. [75] A 4. pontba beépített feldolgozást emiatt jobban preferálják, hiszen az itt visszamaradt alapanyag már nehezebben bontható összetételű. A kevert iszap 5. pontbeli kezelése ugyanakkor nem csak az iszap további rothasztásának hatékonyságát segíti elő, hanem annak ártalmatlanítását is. A fermentlé további fermentálása, azaz a 6. pontbeli előkezelés, a rothasztó torony biogáz hozamának mennyiségét, minőségét növelheti. A folyamat ezen pontjában történő beavatkozás célja lehet a szárazanyag tartalom és a patogének további csökkentése. Az 1. és 2. pontbeli beavatkozás, a tartózkodási idő növelése, extra CO<sub>2</sub> kibocsátása és az energiaköltség szempontjából jelentős.

A 3., 4., 5., 6., pontbeli kezelések az anaerob degradáció hatékonyságát segíti elő. A továbbiakban ezen előkezelési lehetőségek típusait és azok hatásait gyűjtöm össze.

#### 2.4.2. Ultrahangos bontási eljárás

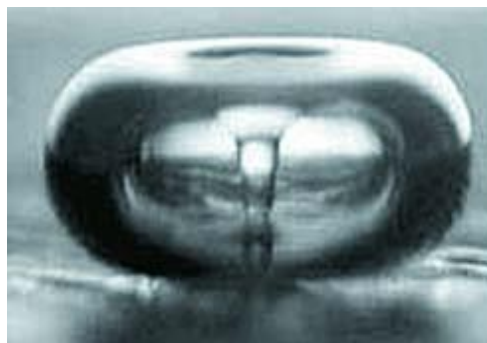
A mesterséges aprítási eljárás optimális kiválasztásánál figyelembe kell venni a technológia költségét, helyigényét, energiafogyasztását, valamint az eljárással együtt járó lehetséges mérgező melléktermékek mennyiségének minimalizálását. Ezen elvárások betartása mellett a mikrobák feltárására gyakran választanak mechanikai módszereket, mivel ezekkel kedvezőtlen melléktermék nélküli, nagyobb mennyiségű alapanyagot is gyorsan fel lehet dolgozni. A műveletek alapja, hogy az elegyet nagy nyírófeszültségnek teszik ki, amit fojtáson való átpréseléssel, erőteljes keveréssel vagy ultrahanggal hoznak létre [76].

A mechanikai kavitációs őrlésen alapuló eljárások esetében melléktermék nem keletkezik, vegyszeres kezelés vagy egyáltalán nincs, vagy elhanyagolható mennyiségben van jelen. Az aprítás szonokémiai módszerekkel, kavitációs tér előállításával – a már említett ultrahanggal –, illetve hidrodinamikus kavitációs berendezéssel is előállítható.

A hidrodinamikus kavitációs berendezés [77] alkalmasan megválasztott technológiai paraméterek és sorrend esetén a biogáz hozam növekedését eredményezi [72].

Szennyvízkezelésnél az ultrahangos technológia terjedt el, a hidrodinamikus berendezést egyenlőre az élelmiszeripar alkalmazza szeparáció céljából [78].

A folyadékban kifejtett intenzív hanghullámok – a mechanikai nyomás és ritkulás során –, kavitációs buborékokat hoznak létre a közegben. A buborékok nem szimmetrikus összeomlásának hatására lökéshullámok alakulnak ki a folyadékban. [79] A jelenség kevesebb, mint 1  $\mu$ s idő alatt zajlik le, miközben a belsejében a nyomás 1000 atmoszféra, a felmelegedés eléri az 5500 Kelvin (13. ábra). Ez az érték közelíti a Nap felszínének hőmérsékletét. Mivel ez a jelenség nagy hőmérséklet és nyomás mellett játszódik le, a folyadékban levő különböző anyagi részecskék felületén erózió/korrózió alakul ki. A buborékok hirtelen összeroppanását fényjelenség is kíséri.



13. ábra Kavitációs buborék és a megsemmisítő túszerű benyomódás (Forrás: T. G. Leighton, 1994.)

A keletkező lökéshullámok az anyagi részecskék jelentős felgyorsulását is eredményezik. [80] A felgyorsult részecskék ütközése nagymértékű változást okoz egymás felületi szerkezetében, reaktivitásában, így kémiai, szerkezeti és fizika alaktani átalakulások mennek végbe a közegben.



Egyszerre van jelen a kavitáció, amit magas frekvencián használnak, valamint a kémiai reakció is, melynek során alacsony frekvencia használatakor  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}^+$  gyökök jönnek létre. Az iszap kezelésére az alacsony, 20–40 kHz frekvencián létrehozott kavitáció a hatásosabb. A buborékok összeomlását a nagy energiatartalom miatt fényjelenségek is kísérik. Ezért nevezik olykor a jelenséget a „hang-fényeffektus”-nak (szonolumineszcencia).

Az ultrahangos kezelés a szennyvíztisztító telepek iszapkezelésének, ártalmatlanításának egyre inkább elterjedő, hatékony mechanikus előkezelési módja. Javítja az iszap, baktériumok általi emészthetőségét, biológiai, fizikai és kémiai tulajdonságait. A dezintegráció mértéke függ az adott iszaphoz igazított optimális értékre beállított paraméterektől. Külföldi tapasztalatok alapján bizonyítottan igazolták az akár 50%-os biogáz hozam növekedési értéket is [81].

Salsabil [82] a kísérletei során kimutatta, hogy létezik egy 1000–16000 kJ/kg<sub>TS</sub> energiaküszöb. Magasabb iszapkoncentráció alacsonyabb küszöbenergiát igényel, mivel a kavitációs buboréknak nagyobb az esélye az iszap szilárd részével való érintkezésre. Ugyanakkor a túl magas szárazanyag tartalom gátolja a kavitáció létrejöttét. Az optimális érték ezek alapján a szárazanyag-tartalom TS = 2,3–3,2% közötti koncentrációs érték.

Az irodalomban található mechanikus ultrahangos szennyvíziszap előkezelés eredményeit tartalmazza az 3. táblázat. A különböző szubsztrátumok, különböző előkezelési paraméterei és vizsgálati körülményei az alábbi eredményeket adták. A kimeneti paraméter vagy a biogáz hozam függvényében, vagy az illékony szerves anyag lebomlásának függvényében került kiértékelésre.

**3. táblázat Ultrahangos mechanikai előkezelés hatásai**

Szubsztrátum	Előkezelés paraméterei	Anaerob fermentáció körülményei	Eredmények	Ref
Kevert iszap	31 kHz / 3,6kW /64s	Folyamatos üzem, 22nap HRT, 37 °C	illékony szerves anyag bomlása 45,8 <sup>a</sup> %-ról 50,3%-ra növekedett	[83]
Eleven iszap	41 kHz/150min	Folyamatos üzem, 8 nap HRT, 37 °C	illékony szerves anyag bomlása 21,5 <sup>a</sup> %- ról 33,7%- re növekedett	[84]
Szennyvíziszap, 54g <sub>TS</sub> /L	20 kHz /200W /30 min	Szakaszos üzem 37 °C	biogáz növekmény 138%	[85]
Kevert iszap	20 kHz /180W /60 min	Szakaszos üzem, 28n HRT, 35 °C	biogáz növekmény 24%	[86]
Eleven iszap 27g <sub>TS</sub> /L	20 kHz, 7000 és 15000kJ/kg <sub>TS</sub>	Szakaszos üzem, 16 nap HRT, 35–37 °C	biogáz növekmény 40%	[87]
Eleven iszap, 2,14% TS	20 kHz, 9600kJ/kg <sub>TS</sub>	Szakaszos üzem, 35 nap HRT, 36 °C	biogáz növekmény 44%	[88]
Eleven iszap	30 kWh/m <sup>3</sup> iszap	Szakaszos üzem	biogáz növekmény 42%	[89]
Eleven iszap	30 kWh/m <sup>3</sup> iszap	Folyamatos üzem, 20 nap HRT	32%-os biogáz hozam és 25% növekedésű illékony szerves anyagbomlás	

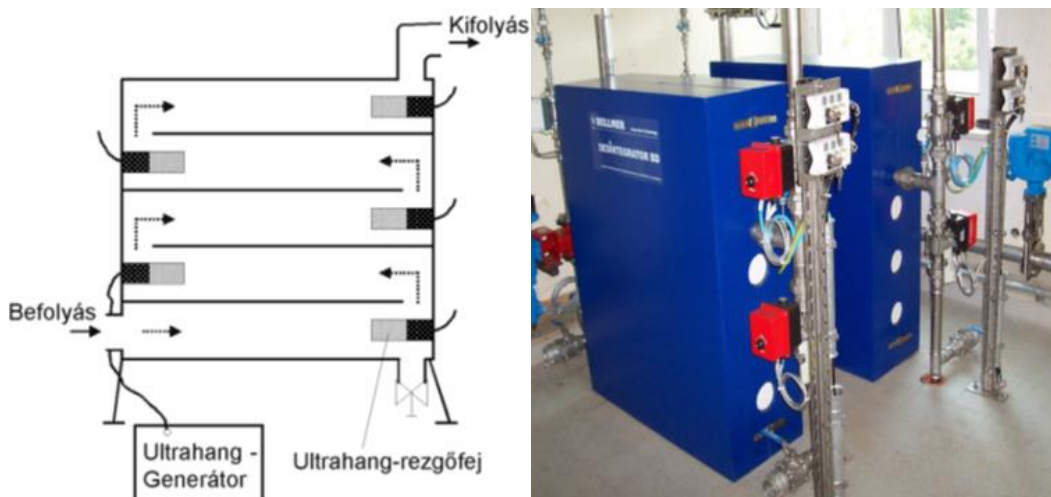
<sup>a</sup> – előkezelés nélküli anaerob bomlás eredményei, HRT- hidraulikus tartózkodási idő

Végeredményben elmondható, hogy a szakaszos fermentációs rendszerben 24%-tól 138%-ig értek el biogáz hozamnövekedést, míg folyamatos fermentációs vizsgálatok során az illékony szerves anyag degradációja 4,5 és 12,2%-os növekedést mutat.

A szonikáció további előnye az iszap ülepedhetőségének javítása, valamint az, hogy alkalmazása meggátolja az emésztő habzását.

A bakteriális szervezetek viszonylag kevés energiafelhasználással járó célzott széttroncsolása jön létre az ultrahangos kezelés során. Ennek oka, hogy a lezajló energiatranszfer jó része főleg a mikrométeres hosszúságú skálán történik, így a döntő mennyiségben jelenlévő, rendkívül nagy fajhőjű közeg (víz) nem melegszik fel számottevően. Összehasonlításként: 1 m<sup>3</sup> 5 %-os szárazanyag tartalmú iszap termikus kezeléséhez (csupán 100C° hőmérséklet-különbséggel, 100%-os üzemi határfokkal számolva), legalább 420 MJ energia szükséges, ugyanezen mennyiségű és minőségű iszap ultrahanggal történő nagy intenzitású, hasonló hatást biztosító kezeléséhez 40 MJ is elegendő. Az eljárás sem a kezelőszemélyzetre, sem pedig a környezetre nézve semmilyen káros vagy kellemetlen hatással nincs. Nem veszélyes üzemű, hely- és karbantartási igénye pedig rendkívül alacsony [90,91].

Az átfolyósos, moduláris rendszerű szennyvíztelepen – Európában és Magyarországon (Zalaegerszegen, Szombathelyen) – is alkalmazott berendezés kiépítésének sematikus képe látható a 14. ábrán [92]. Az iszapot szivattyú segítségével alulról vezetik a berendezésbe, majd labirintusszerűen folyik tovább – ötszörös besugárzásnak kitéve – az ultrahang generátorok (piezoelektromos rezgőfejek) frekvenciájára hangolt kezelőtérben.



14. ábra A bambergi szennyvíztelepen üzemelő két (Ultrawaves-Sonotronic) ultrahang- reaktor  
(Forrás: Németh Zs., Kárpáti Á. 2009.)

2010-ben három darab Sonotronic gyártmányú, párhuzamosan kapcsolt, egyenként 2 m<sup>3</sup>/h kapacitású (összesen 6 m<sup>3</sup>/h kapacitású) ultrahangos berendezést telepítettek próbaüzembe a szombathelyi szennyvíztelepen, mellyel kettős célú iszapkezelési résztechnológia valósult meg:

- a sűrített fölös iszap kezelése a rothasztóba betáplálás előtt, melynek célja a fajlagos biogáz hozam növelése és a fölös iszap tömegének csökkentése,
- továbbá az utóülepítőből származó recirkulációs iszap kezelése a „*fonalasodási*” probléma miatt.

2011. január 28-tól az ultrahangos rendszerrel kezelt fölös iszapot az anaerob medencébe vezetik vissza, ezzel növelve a mikroorganizmusok számára hasznosítható szerves anyag mennyiségét. A fölös iszap sejteiben ugyanis a C/N arány sokkal jobb, mint az iszapsejtek közti vizes oldatban. Azonban a sejtekbe épült szerves szén csak a sejtek ultrahangos roncsolása után válik a denitrifikáló baktériumok számára hozzáférhetővé. Az ultrahangos kezelés így jelentősen javítja a denitrifikáció hatékonyságát, valamint a foszforeltávolítást is.

A szombathelyi szennyvíztelepen is kipróbálásra került átfolyósos rendszerű ultrahangos kavitációs berendezés eredményei:

1. Az anaerob rothasztás előtti alkalmazása jelentősen (15–18%) megnövelte a fajlagosan képződött gázmennyiséget.
2. A kezelt iszapot visszavezetve a fermentorba, sikeresen javult a denitrifikáció és a kezelés hozzájárult a hatékony foszfor-eltávolításhoz is [93].

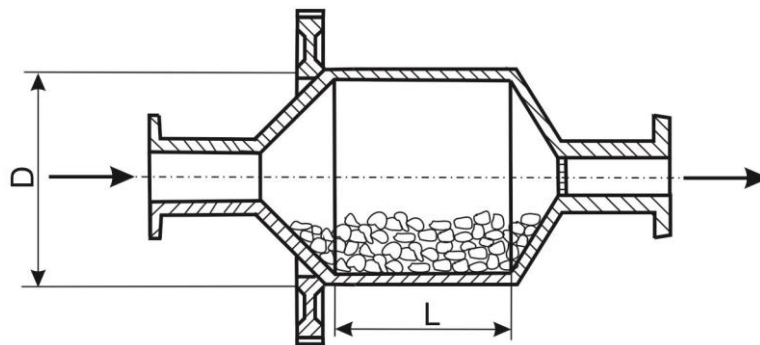
Az üzemi tapasztalok igazolták, hogy a jövőben, a kolloidális szerves anyagok – mint például a kommunális szennyvíz –, rothasztásának előkezelési technológiai között jelentősebb helyet fog elfoglalni ez az eljárás.

Az ultrahangos aprító eljárás is számos előnnyel és hátránnyal rendelkezik. Erőteljes hőfejlődéssel és nagy hangképződéssel jár. Egyik legnagyobb hátránya, hogy egy ultrahang rúddal csak szakaszos üzemet tud biztosítani. Több rudas, sorba kapcsolt átfolyós rendszer lehetővé teszi az aprítás időbeni folyamatosságát, de a szerkezet kivitelezési költsége emiatt jelentősen megnő. Az ultrahang besugárzását végző rudat időközönként cserélni kell, mely a mérettől és az alkalmazási időtől függően, jelentős karbantartási költségterhet jelent. A módszer másik hátránya, hogy egyértelműen kimutatható enzimbomlást okoz. Ennek egyik oka a szabad gyökök képződésében keresendő. A bevitt energia növelésével a gyökképződés gyakorisága szintén növekszik. Nagyon érzékeny eljárás, mert a kavitáció kialakulását több külső tényező is befolyásolja. Ilyen például a közegetérfogat mennyisége, vagy a tároló edény mérete és alakja. A szárazanyag-tartalom néhány %-os korlátja is tovább nehezíti technológia széleskörű elterjedését.

### 2.4.3. Őrlés, gyöngymalom

A nedves aprító berendezés a finom aprítóberendezések azon csoportjába tartozik, melyek az alapanyag aprításához vivőközeget (általában vizet vagy iszapot) alkalmaznak, vagy maga az alapanyag kolloid tulajdonságú. A kis szemcseméretű és kis szárazanyag tartalmú alapanyagok feldolgozása, aprítása során nem csupán a további szemcseméret csökkenés az őrlés célja. Ilyen alapanyagok esetén a kolloid finomságú anyag sejt feltárása, szeparációja vagy a felület megújítása a kívánatos.

A gyöngymalmok alkalmazása során több roncsolási mechanizmus működik egymás mellett, a szemcsék ütközése, legördülése és a rétegek között fellépő nyíróerő egyaránt hat (15. ábra). A feltárást számos technikai paraméter befolyásolja: a gyöngyök mérete, a feltöltés mértéke, a sejt koncentráció a szuszpenzióban, a keverőelem kialakítása, mérete és kerületi sebessége, a hőmérséklet, folytonos üzemben a betáplálás sebessége. Ezekon kívül ugyanaz a malom másképpen működik vízszintes és függőleges helyzetben.



15. ábra Gyöngymalom [76]

A felsorolt paraméterek nem csak a feltárási mértékét határozzák meg, hanem a teljesítmény felvételt is. Az aprítandó alapanyag típusa befolyásolja az optimális paramétereket, ami több komponensű szubsztrátum esetén igen kedvezőtlen eredményeket mutathat. A gyöngyök méretével kapcsolatban szerzett tapasztalatok sem egyértelműek. Az élesztők kezelésénél a 0,5–2,8 mm közötti tartományban a legkisebb méretű üveg szemcsefrakció bizonyult a leghatásosabbnak. Más kísérletek szerint az optimum 0,25–0,5 mm között van, e fölött és ez alatt romlik a feltárási hatás. További eredmények szerint az optimális átmérő függ attól, hogy citoplazma, vagy membránkött enzimet akarunk kinyerni. Általánosítható megfigyelés, hogy minél kisebb a sejtek mérete, annál kisebb az optimális átmérő is. Így a baktériumok feltárásihoz kisebb frakciót célszerű használni, mint az élesztőkhöz. Az üzemeltetés során figyelembe kell venni, hogy folytonos üzemmódban az elvételnél az üvegszemcséket vissza kell tartani az őrlőtérben. Kis gyöngyátmérőnél a szeparátor nyílásai is kisméretűek, ami eltömődési veszéllyel és nagy áramlási ellenállással jár.

4. táblázat Golyós őrlő malommal történő előkezelés hatásai a degradációra

Szubsztrátum	Előkezelés paraméterek	Anaerob fermentáció körülményei	Eredmények (növekmény)	Ref
Eleven iszap, 7 napos SRT	$d_b$ :0,25mm, $v_b$ :10 m/s, 90min, 60 °C	Szakaszos üzem, 21 nap, 37 °C	10%-os biogáz növekmény	[94]
Eleven iszap, meghosszabbított SRT	$d_b$ :0,25mm, $v_b$ :10 m/s, 90min, 60 °C	Szakaszos üzem, 21 nap, 37 °C	24%-os biogáz növekmény	[94]
Kirothasztott iszap	$d_b$ :0,25mm, $v_b$ :10 m/s, 90min, 60 °C	Szakaszos üzem, 21 nap, 37 °C	62%-os biogáz növekmény	[94]
Eleven iszap, 3 napos SRT	$d_b$ :0,35mm, $v_b$ :6 m/s, 2000kJ/kg TS	Folyamatos üzem, 7 nap HRT	illékony szerves anyag bomlása 42 <sup>a</sup> %- ről 47%-re növekedett	[95]
Eleven iszap, 3 napos SRT	$d_b$ :0,35mm, $v_b$ :6 m/s, 2000kJ/kg TS	Rögzített sejtes reaktor, 2 nap HRT	illékony szerves anyag bomlása 26 <sup>a</sup> %- ről 37%-re növekedett	[95]

<sup>a</sup> – az előkezelés nélküli anaerob bomlás eredményei,  $d_b$ - a malom golyójának átmérője,  $v_b$ - a malom golyójának sebessége, SRT – tartózkodási idő, HRT – hidraulikus tartózkodási idő

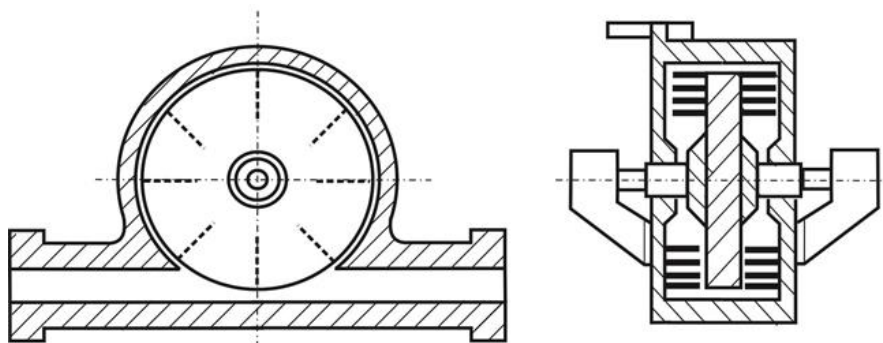
A kamrába töltött üveggyöngyök mennyisége mind a feltárássra, mind az energia felvételre hatással van. A feltáráss szempontjából a nagyobb mértékű 80–88% között töltés az előnyös. A sejt szuszpenzió ekkor szinte csak a hézagterefogatban helyezkedik el. A töltés mértékével viszont a teljesítményfelvétel is nő, ami a hőmérséklet növekedését eredményezi.

A keverő kerületi sebességének növelése a technológiailag kihasználható tartományban (10–20 m/s) fokozza a feltáráss hatékonyságát, extrém nagy sebességek esetén viszont a fellépő ellentétes hatások miatt ez a növekedés lelassul, majd leáll (4. táblázat) [76].

#### 2.4.4. Sűrítő centrifuga és folyadéknyírásos technológia

A Lysis sűrítőcentrifugát alkalmazzák például szennyvizek víztelenítésénél. Ilyen technológia került a szennyvíztelepen üzembe helyezésre a csehországi Liberec-ben (1.000.000 lakos egyenérték) Furstenfeldbruck-ban (70.000 lakos egyenérték) és németországi Aachen-Soers-ben (650.000 lakos egyenérték). A gépegység beépítésével a biogáz-termelés hozama 15–26%-kal növekedett [96,97].

A folyadéknyírásos technológiát két nagy csoportra osztja a szakirodalom. Az első az ütköző lemezes, ahol az iszap nyomását egy nagy nyomású pumpa segítségével 30–50 bar-ra emelik. Eközben egy fúvócsövön áthalad a szubsztrátum, ami nekicsapódik az ütközőlemezeknek. Az iszap nyomása lecsökken és 30–100 m/s sebességgel ütközik a felületnek. Ennek az eljárásnak a hatékonyságát napjainkig csak laboratóriumi körülmények között vizsgálták, ahol megállapították, hogy a degradáció retenciós ideje 14-ről 6 napra csökken. Ugyanakkor a kezelés az anaerob emésztésre nem volt jelentős hatással [98,99].



16. ábra Kolloid malom [100]

A *kolloid malmok* a nedves aprítás olyan berendezései, melyekben az ütő, vagy dörzsölő hatás 0,1 $\mu$ m-nél kisebb szemcseméretet eredményez. Az ütőhatással aprító malom (16. ábra) az összenyomhatatlan folyadékokra gyakorolt nagy szaporaságú ütésekkel biztosítja az őrlést. A kolloid dörzsmalmok aprítása pedig nyíró igénybevétellel fejt ki hatását. Az 1000- 20000/min fordulatszámú forgórész és a berendezés álló része között kb. 50  $\mu$ m nagyságú rés van. Ezen a résen keresztüláramló, iszap formájában beadagolt anyagot, a malom kolloid finomságúra képes őrölni.

A másik típusú folyadéknyírás alapuló berendezés, a magas nyomású *homogenizátor*. Amikor az iszap áthalad egy homogenizáló szelepen, akkor nyomása eléri a 900 bar értéket, aztán hirtelen leesik. Az ilyen típusú berendezések már több helyen is alkalmazásra kerültek. Onyeche [101] szerint 150 bar nyomáson alkalmazva az iszából nyert biogáz hozam 30%-os növekményt mutatott, a visszamaradó iszap mennyisége pedig 23%-kal csökkent. Folyadéknyírásos technológia előkezelésének hatásai az 5. táblázatban találhatók.

5. táblázat Folyadéknyírásos technológia előkezelésének hatásai

Szubsztrátum	Előkezelés paraméterek	Anaerob fermentáció körülményei	Eredmények (növekmény)	Ref
Eleven iszap	ütközéses eljárás 30 bar	Szakaszos üzem, 35 °C, 26 napos HRT	illékony szerves anyag bomlása 35 <sup>a</sup> %-ról 50%-re növekedett	[98]
Eleven iszap, 14–18 g <sub>TS</sub> /L	ütközéses eljárás 30 bar	Kevert szakaszos üzem, 35 °C, 6, 8, 13 napos HRT	illékony szerves anyag bomlásának 30%-os növekedése	[99]
Eleven iszap, 3 napos SRT	400 bar homogenizáló	Rögzített sejtes reaktor, 2,5 nap HRT, 35 °C	illékony szerves anyag bomlása 40 <sup>a</sup> %-ról 51%-re növekedett	[102]
Eleven iszap, 13 napos SRT	400 bar homogenizáló	Rögzített sejtes reaktor, 2,5 nap HRT, 35 °C	illékony szerves anyag bomlása 15 <sup>a</sup> %-ról 28%-re növekedett	[102]
Eleven iszap	300 bar homogenizáló 7500 kJ/kg <sub>TS</sub>	Kevert üzem, 35 °C, 10–15 nap HRT	illékony szerves anyag bomlása 129 <sup>a</sup> %-ról 206%-re növekedett	[103]
Eleven iszap	300 bar homogenizáló 7500 kJ/kg <sub>TS</sub>	Rögzített sejtes reaktor, 2,5 nap HRT, 35 °C	CH <sub>4</sub> 178 ml/g illékony szerves anyag	[103]
Kevert iszap	600 bar homogenizáló	Kevert szakaszos üzem, 36 °C, 20 nap HRT	18%- os biogáz hozam növekmény	[104]

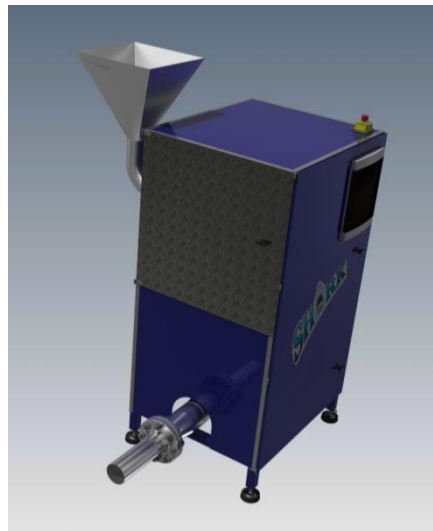
<sup>a</sup> előkezelés nélküli anaerob bomlás eredményei, SRT – tartózkodási idő, HRT- hidraulikus tartózkodási idő

## 2.5. Iszapkezelő technológia alkalmazása biomassza szubsztrátum előkezelésére

Az előző fejezetekben bemutatott iszapkezelő berendezések nehezen beállítható, sokszor szűk alkalmazhatósági határok között alkalmazhatók. Továbbá nagymértékben drágítják a mezőgazdaságból hulladékként keletkező szubsztrátum biogáz alapanyagként való előkezelését.

Kutatásaim és üzemlátogatásaim során felleltem Dr. Németh Zsolt magyar fizikus, folyadéknírási és ütközés elvén alapuló nedves aprító berendezését.

A tisztán mechanikus elven működő gépegység egyszerű szerkezeti elemeket tartalmaz, ami lehetővé teszi a berendezés alacsony áron történő beszerzését, valamint karbantartási költségét. A Shark fantázia névre hallgató őrlő berendezés közel a 170 m/s sebesség értékre gyorsított alapanyag határfelületeit roncsolja nagy nyíróerők jelenlétében (17. ábra).



17. ábra Shark berendezés (Forrás: saját kép)

A néhány éve szabadalmaztatott előkezelő berendezés próbaüzemben működik néhány szennyvíztisztító telepen. Versenytársa vagy kiegészítője lehet a szennyvíztelepen telepített magas beruházási és üzemeltetési költséget jelentő ultrahangos technológiának. Jelenleg Zalaegerszegen, Dunaharasztiiban és Stremben (Ausztria) van a szennyvíztelep technológiai sorrendjébe építve, a fermentor beadagoló ágába kötve.

Mezőgazdasági biogáz erőmű szubsztrátumának előkezelése céljából még nem alkalmazták. Értekezésemben közölt kísérleteim arra irányulnak, hogy e berendezés alkalmazhatóságát és annak körülményeit vizsgáljam mezőgazdasági alapanyag egylépcsős, valamint kétféle fermentálé további fermentációja után keletkezett biogáz termelésre.

### 3. A vizsgálat alapanyagai, eszközei, a mérések módszerei és eljárásainak ismertetése

Kutatási célom egy folyadéknyírás és ütközés elvén működő berendezéssel történő mechanikus előkezelés hatásának vizsgálata búzaszalma fermentációja, valamint szennyvíztelepi és mezőgazdasági fermentlé utófermentációja során. A kísérlet alkalmával vizsgált alapanyagok, eszközök és mérési eljárások leírását az alábbi fejezetekben ismertetem.

#### 3.1. Mérési alapanyagok

A fent említett búzaszalma, szennyvíztelepi fermentlé és mezőgazdasági fermentlé szubsztrátumok anaerob fermentációját az előkezelésüket követően végeztem el. A különböző alapanyagok felületkezelése Shark nedves alapanyag aprító berendezésen történt. Vizsgáltam a fermentáció során kapott biogáz mennyiségét, minőségét és a bomlási időt. Mindhárom vizsgálati alapanyag fermentációjához oltóiszapot alkalmaztam. [105]

A vizsgálati szubsztrátumok és oltóiszapok az alábbiak:

- 1., Szubsztrátum: előkezelt búzaszalma vizes szuszpenziója,  
Oltóiszap: mezőgazdasági alapanyagú biogáz telep fermentorának fermentleve,
- 2., Szubsztrátum: előkezelt szennyvíztelep rothasztó tornyának fermentleve,  
Oltóiszap: szennyvíztelep rothasztó tornyának fermentleve,
- 3., Szubsztrátum: előkezelt mezőgazdasági alapanyagú biogáz telep fermentorának fermentleve,  
Oltóiszap: mezőgazdasági alapanyagú biogáz telep fermentorának fermentleve.

A fermentáció folyamatának mikrobiológiai és eljárási ellenőrzésére mindhárom esetben mikrokristályos cellulózt (*Cellulosum Microcristallinum*) választottam.

##### 3.1.1. A búzaszalma, mint kísérleti alapanyag

Első vizsgált szubsztrátumként a búzaszalma (*Triticum aestivum*) szára került alkalmazásra. A búza (18. ábra) az egyik legnagyobb területen termesztett növény, világszerte 245–250 millió hektáron fellelhető. Elterjedését jó alkalmazkodóképessége tette lehetővé, és szinte mindenhol megterem, kivéve a szélsőséges időjárású területeket. Magyarországon 2012-ben 1,01 millió hektáron közel 4 millió tonnányit takarítottak be. [106]

A szalma a növény termés nélküli szára és levélzete. A nagy mennyiségben rendelkezésre álló alapanyag jellemzője a nagy rosttartalom, a kis fehérje-, zsír- és vitamintartalom. A kálium kivételével rendszerint alacsony az ásványi anyag tartalma. [9]





18. ábra Búzatábla a Dunántúlon (Forrás: Halász Z., 1980.)

A gabonafélék olyan, a pázsitfűfélék (Gramineae) családjába tartozó növények, melyet emberi vagy állati táplálkozás céljából évezredek során nemesítettek. Hazánkban a legnagyobb mennyiségben előforduló gabonaféle termésétől és gyökerétől mentesített része a szalma. E szár és levélzet együtt kerül állati almolás vagy papíripari nyersanyagként való hasznosításra. A termés mennyisége időszakos és évenként változó. Mivel hasznosítás szempontjából másodlagos a növényzet szára, ezért az utóbbi évtizedekben a nagyobb terméshozamú, de rövidebb szárral rendelkező fajtákat részesítik előnyben a gazdák. Ez az aratás utáni tárolási költségek csökkentését okozza.

A fermentációs rothasztásuk során végbemenő feltárhatóságukat könnyíti, hogy a cellulóz alapú egynyári növények közül ezek tartalmazzák a legkevesebb lignint.

6. táblázat. Kémiai összetétel a száron belül [107,108]

Megnevezés	Szár a csomók között	Csomók	Levél
Klason lignin (%)	18,9±0,1	14,8±0,2	13,5±0,2
Összes lignin (%)		23,22	17,48
Holocellulóz (%)	71,24		56,95
Rost hossz. (mm)	1,73	0,82	

Nagy hamutartalommal rendelkeznek, ami a mezőgazdasági műtrágyák alkalmazásának is köszönhető. A másik ok, hogy a talajhoz közelebb elhelyezkedő kis magasságú növény felületén nagyobb mennyiségű szilikát rakódik le. [107]

7. táblázat. A búzaszalma fizikai jellemzői [109]

Megnevezés	Tömeg [%]	Rosthosszúság [mm]
Szár a csomók között	68, 5	1,2
Csomók	04, 2	0,65
Levél	25, 8	0,79
Egyéb törmelék	1, 5	

A gabonaféléknek rövid rostjaik vannak, hosszuk 1,0–1,5 mm, a tarcheidák átmérője 5–24 µm, a parenchima mérete 57–142 µm (7. táblázat). A rostátmérője hatással van a szakító- és tépőszilárdságra, valamint a fermentáció előtti előkezelés hatékonyságára.

**8. táblázat A búzaszár és levél ásványi anyag tartalma**

Kémiai anyagok	Észlelhetőségi határ	Szár a csomók között	Levél
Alumínium, Al	20	<20	40–100
Bór, B	20	<20	<20–30
Bárium, Ba	1	28–83	47–86
Kalcium, Ca	10	1130–3300	5950–8230
Króm, Cr	1	<1	<1–3
Réz, Cu	2	3...5	4...6
Vas, Fe	5	21–87	88–175
Kálium, K	1000	13000–34000	920–1710
Magnézium, Mg	10	500–2970	2000–2790
Mangán, Mn	0,5	10,4–25,1	34,9–128
Molibdén, Mo	1	<1–2	<1
Nátrium, Na	50	60–260	50–130
Foszfor, P	20	330–1030	920–1710
Ón, Sn	5	<5–6	<5–7
Stroncium, Sr	0,5	5,8–15,9	22,1–37,8
Cink, Zn	1	7...24	15–24

Kémiai vegyületei mennyiségileg nem mutatnak kiugró értéket összehasonlítva más növényekkel (8. táblázat). Kivételt képez a kálium tartalom, mert az több mint egy átlagos fa esetében. A rostosításra ezek a mennyiségek nincsenek hatással, kivéve a kálium tartalom, ami azt negatívan befolyásolja [110].

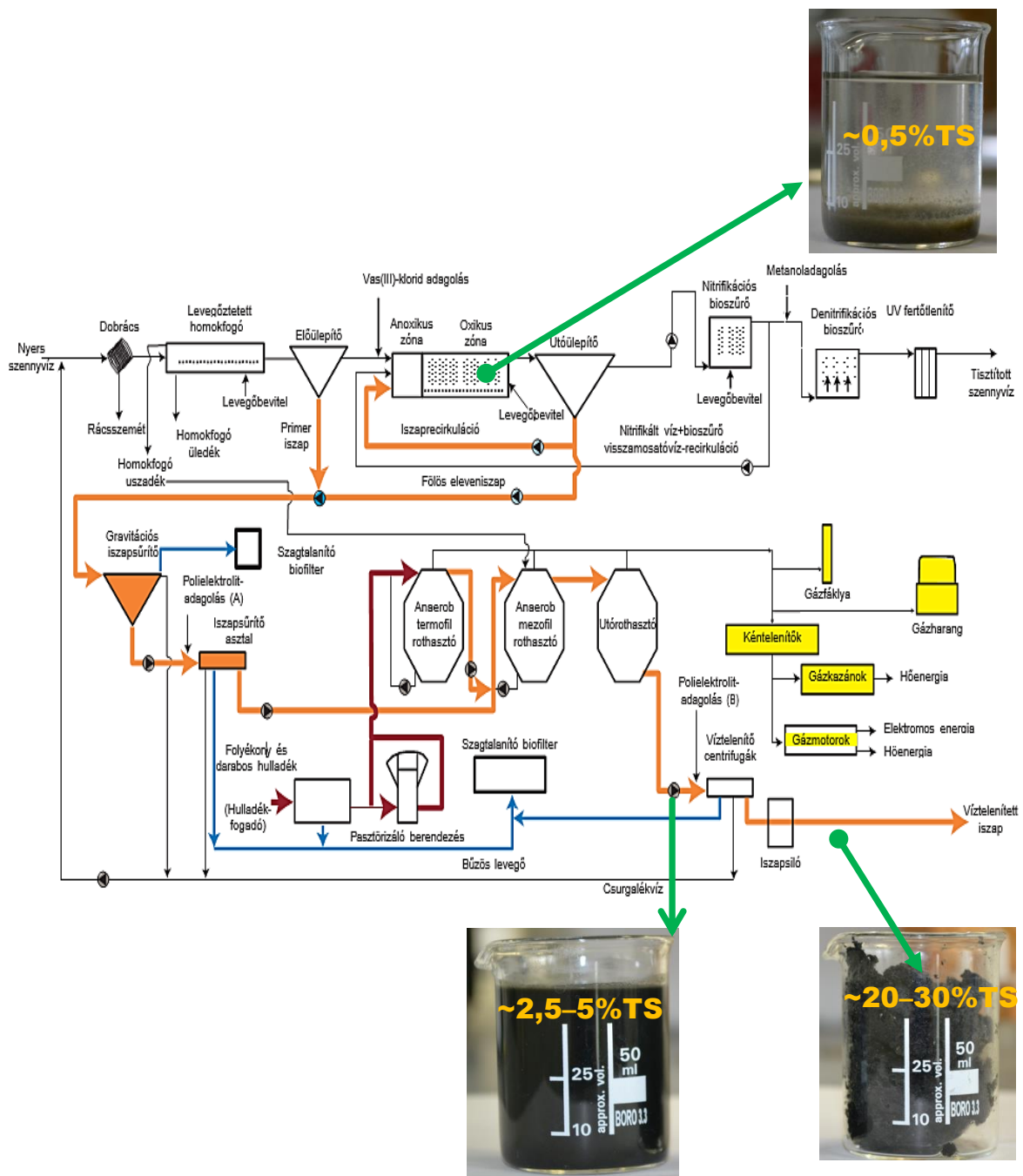
### 3.1.2. Szennyvíztelepi fermentáció, mint fermentációs alapanyag

Kísérleteimben szubsztrátumként került alkalmazásra a szennyvíziszap rothasztott fermentleve, a szennyvíztelepi fermentlé is. Az élővizeink megóvására használt technológiák egyre fontosabb szerephez jutnak. Ezzel szorosan összefügg a szennyvíztisztítás. Ez a folyamat nagy energiaigényű, viszont a környezetre káros anyagok megfelelő felhasználásával, megújuló energia állítható elő.

A Délpesti Szennyvíztisztító telepen a szerves hulladék és szennyvíziszap együttes kezelése történik, ennek eredményeképp biogázt állítanak elő. A szennyvíztisztítás technológiai sorrendjét mutatja a 19. ábra.

A szennyvíztelep előületőiben leválasztásra kerülő nyersiszap, valamint a biológiai fokozatok fölősiszapja betáplálásra kerül az iszapkezelés műtárgyaiba. A szerves anyag aerob és anaerob

lebomlása a szennyvíztelepen, több lépcsőben megy végbe. Ezek mindegyikét különböző baktériumcsoportok végzik biológiai úton.



19. ábra A szennyvíztelep felépítése, iszaptípusok (Forrás: Délpesti Szennyvíztisztító Telep)

A rothasztókba kerülő iszapot előzetesen sűríteni kell, hiszen a reaktortérfogat állandó, így a sűrűbb rátáplált iszap, nagyobb biomassza tömeget jelent, amely több gáz képződését eredményezi. A sűrítési eljárás során a kiindulási pontot a kb. 0,5%-os szárazanyag-tartalmú eleveniszap jelenti, amelyet 5–7%-osra sűrítnek a rátápláláshoz. A rothasztók iszapja elvétel után ismételen átmegy valamely sűrítési technológiai lépésen, így az iszapkezelési technológia végterméke rothasztás után

20–30%-os vagy akár 40%-os szárazanyag-tartalmú, amely már gazdaságosabban szállítható és deponálható.

A szennyvízkezelés termékeként keletkező magas szervesanyag-tartalmú iszap, valamint az ipari és városi hulladékból származó szerves anyagok együttes fermentációjából biogáz állítható elő, amely fedezi a szennyvíztisztítás energiaigényének egy részét.

A kísérletekhez a centrifugálás előtti rothasztott iszapot (fermentlevet) használtam fel, ami közvetlenül jön ki a toronyból, tehát a rothasztók iszapjával teljesen ekvivalens (20. ábra).



20. ábra 2,5–5%-os szárazanyag-tartalmú rothasztott iszap (Forrás: saját kép)

Az általam vizsgált szennyvíziszap rothasztott fermentlevének az üzemben mért jellemzőit a 9. táblázat tartalmazza.

**9. táblázat A szennyvíziszap rothasztott fermentlevének általános jellemzői (Délpesti Szennyvíztisztító telep adatai alapján)**

Szárazanyag-tartalom	39,5 g/kg
Szerves szárazanyag-tartalom	23 g/kg
Szervetlen szárazanyag-tartalom	16,5 g/kg
pH	7,1–7,6
Illó szerves sav	260–1140 mg/l
Lúgosság	3840–6320 mg/l

Az kísérleteim során felhasznált minták általam mért szárazanyag-tartalma 3,67–3,71%, szerves szárazanyag-tartalma 58,26–64,02% érték között helyezkedett el.

### 3.1.3. Mezőgazdasági szubsztrátummal üzemelő biogáz reaktor fermentleve, mint fermentációs alapanyag

A fermentlé előkezelések másik szubsztrátumaként a dömsödi biogáz üzem (21. ábra) fermentlevét vizsgáltam. Az üzem hagyományos mezőgazdasági alapanyagú rothasztási technológiát alkalmaz a biogáz előállítására. Az üzemet az Elmib Innovatív Energetikai Zrt. tartja fenn, míg a szükséges technológiát a német AEV Energy GmbH gyártotta.

A település szennyvize és a környéken keletkező mezőgazdasági hulladék környezetbarát hasznosítása mellett alkalmas a veszélyesnek minősülő éttermi hulladék felhasználására. Itt hasznosítják a környékbéli állattartásból származó trágyát is.

Az üzem négy darab különálló fermentorral rendelkezik. Az előfermentorok kisebb térfogatúak ( $1300\text{ m}^3$ ), az utófermentorok nagyobb térfogattal ( $2700\text{ m}^3$ ) rendelkeznek. A mezofil hőmérsékleten temperáló, lassú és gyors keverővel is ellátott fermentorokban hozzávetőlegesen 7,8–7,9 (maximum 8,4) pH értékkel rendelkezik a fermentációs anyag.



21. ábra A dömsödi biogáz telep (Forrás: ELMIB – tiszta energia, 2010.)

A kisebb fermentorokba óránként történik a betáplálás, minden alkalommal  $1\text{ m}^3$ -t vesznek el illetve  $1\text{ m}^3$  friss alapanyagot adnak a rendszerbe. A darabos hulladékot darálószivattyúval ellátott garaton engedik be a fermentorok mellett kialakított tárolóba. Az élelmiszeripari hulladék, pasztörizálás után egy másik elkülönített tárolóból jut a fermentorokba. A  $4000\text{ m}^3$  kapacitású szilárd hulladéktárolóba helyezik el a tehéntrágya, a szilárd hulladékok és a siló alapanyagait.

Az átlagosan 8%-os szárazanyag-tartalommal rendelkező alapanyag betáplálásának során a szárazanyag-tartalom lecsökken 4–6%-ra. A termelt biogázt két darab 716 kW-os Deutz gázmotor dolgozza fel és állítja elő ez által a villamosenergiát. Az üzem a termelt villamos energiát a villamosenergia hálózatba táplálja.

Az elvégzett kísérleteim során felhasznált fermentlé minták szárazanyag tartalma 3,16–4,66%, szerves szárazanyag-tartalma 60,74–64,63% érték között helyezkedett el. A kezeletlen dömsödi fermentlé a pH = 7,3 értékkel rendelkezett.

### 3.1.4. Oltóiszap fajták

A folyadéknyíró és ütközéssel elvégzett nedves aprítást követően beoltottam a kezelt szubsztrátumokat.

#### *A búzaszalma fermentációs oltóiszapja*

A fermentációs kísérlet a VDI 4630 *szerves anyagok fermentációs eljárás* [105] szabályozó ajánlása alapján zajlott. Ebben kerül megfogalmazásra, hogy a mezőgazdasági eredetű alapanyagok vizsgálata során oltóiszapként, a mezőgazdasági biogáz fermentorokból származó oltóiszap használata javasolt. Emiatt a búzaszalma kísérletben felhasznált oltóiszap származási helye a dömsödi biogáz üzem.

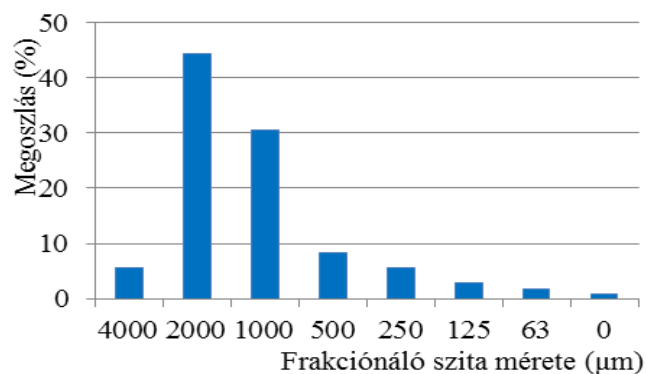
#### *A szennyvíztelepi és a mezőgazdasági alapú fermentáló oltóiszapja*

Mindkét előkezelt fermentáló alapú kísérletsorozatnál a további utófermentálásukhoz saját (kezeletlen) fermentlevüket oltottam hozzá. Azaz, a szennyvíziszap alapú fermentáléhoz a rothasztók, a mezőgazdasági alapú fermentáléhoz a mezőgazdasági fermentor iszapját adtam.

### 3.1.5. A felhasznált alapanyagok előkészítése, tárolása

#### *a., Búzaszalma*

A kísérlet alapanyagául szolgáló, szecsázott, maximum 2–3 cm nagyságú száraz búzaszalmát 4 mm-es, 2 mm-es, 1 mm-es, 500 mikrométeres, 125 mikrométeres és 63 mikrométeres tálcával rendelkező, rázó szitasoron frakcionáltam. Ennek alapján készítettem el a szubsztrátum szemcseeloszlását. Előkísérletek tapasztalatai alapján az 1 mm-es szitatálcán fennmaradt frakciót használtam (22. ábra).



22. ábra Búzaszalma százalékos méret eloszlása

#### *b., Fermentlevék előkészítése*

A búzaszalma fermentációjának beoltása a 4 napon keresztül szobahőmérsékleten éhezett dömsödi fermentlével történt.

A szennyvíziszap fermentlé és a mezőgazdasági fermentlé kísérletsorozat esetében a kísérlet indítása előtt 36–48 órával került ki a szubsztrátum az üzemek rothasztó tornyából ill. fermentorából.

A mezőgazdasági fermentlevet – a benne levő megmaradt nagyobb növényi maradványok miatt –, közvetlenül a kísérlet elindítása előtt 4 mm-es szitasoron átszűrve homogenizáltam.

### 3.2. Mérési eszközök és berendezések

#### 3.2.1. A folyadéknírási és ütközési elvén alapuló előkezelő berendezés

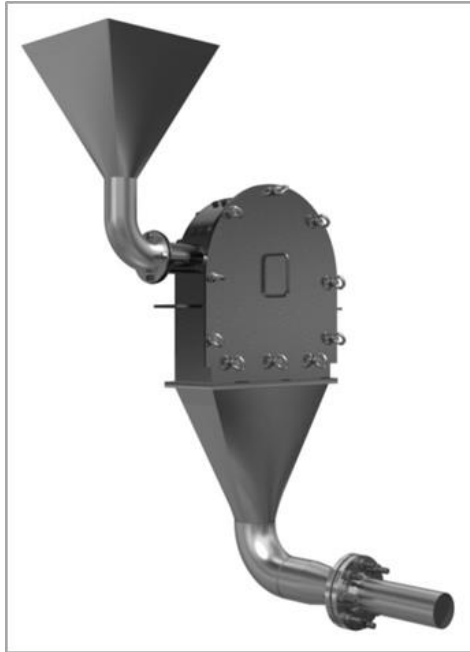
A SHARK fantázianevet viselő gép egy vágómalom típusú nedves aprító berendezés. A mechanikai előkezelést ezzel a berendezéssel végeztem (23. ábra). A nedves aprító gépben a felületnövelés és roncsolás, folyadéknírási és ütközési elvén valósul meg. A szerkezetben egy belső forgótárcsás rész a beadagolt maximum 8% szárazanyag tartalmú vizes szubsztrátumot körülbelül 170 m/s sebességre gyorsítva, jelentős nyíróerőt ébreszt, a réteg határfelületein szétroncsolva ezzel a részecskék tekintélyes hányadát. A gép alkalmas a vizes közeg ipari körülmények között történő többszöri recirkuláltatására.



23. ábra Shark nyírótechnológiával működő vizes aprító berendezés (Forrás: saját kép)

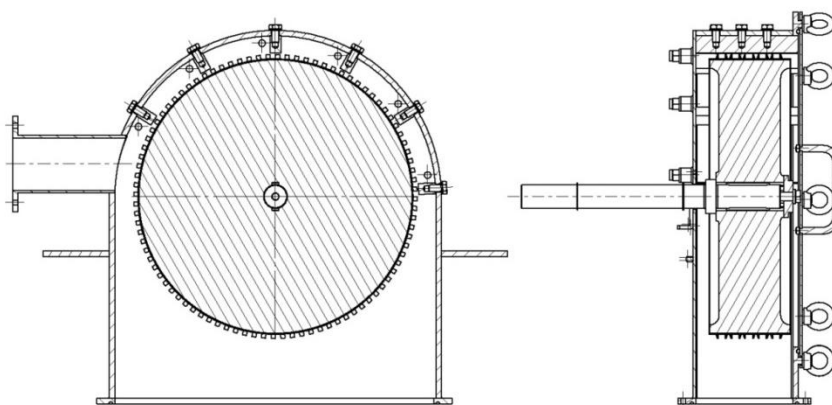
Felépítését tekintve a berendezés főbb részei a vázszerkezet, az aprító egység, és ez utóbbit kiszolgáló egységek, mint a hajtómotor, az ehhez tartozó elektromos berendezések, kábelek.

A korrózió megelőzése érdekében az aprító egység (24. ábra) alkatrészei rozsdamentes acélból és alumíniumból készültek. A szubsztrátum a betöltő tölcseren és a bevezető csövön át érkezik a sűrűn elhelyezkedő aprító fogakra, melyek a forgódob palástján csigavonalban futnak le.



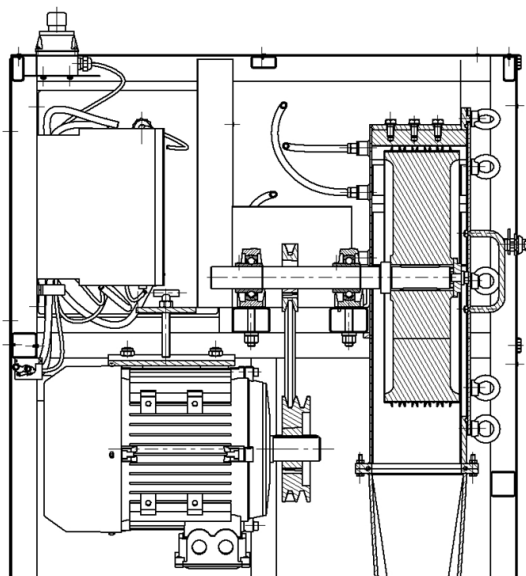
24. ábra Aprító egység betöltő tölcserrel és a kivezető csővel (Forrás: saját kép)

Az aprító rész belső kialakítása a 25. ábrán látható. A tengely két gördülőcsapággal van rögzítve, melyek közt egy kúpos szorítóhüvelyes szíjtárcsa biztosítja a nyomatékátvitelt. A tengely konzolos részéhez van rögzítve az aprító dob, ami a fellépő tömeget és a lehető legnyugodtabb járás érdekében centírozott.



25. ábra Az aprító egység felépítése (Forrás: saját kép)





26. ábra Nyomatékátvitel bemutatása metszeti rajzon (Forrás: saját kép)

Maga a motor fejjel lefelé egy lemezre van rögzítve, amely így a saját súlyánál fogva is feszíti az ékszíjat. Emellett egy ellenanyás, menetes szár biztosítja a további előfeszítő erőt az ékszíz számára (26. ábra).

A motor fordulatszáma frekvenciaváltóval szabályozható. A 200–3500 fordulat/perc tartományban üzemeltethető gép alkalmas a vizes szuszpenziók többszöri recirkuláltására.

Működése egyszerű fizikai elveken alapul. A fogak és a folyadék sebességkülönbsége miatt jelentős nyíró igénybevétel keletkezik, ami az áramló folyadékban a szilárd anyag határfelületein végez roncsolást. Emellett a kezelt anyag nagy sebességgel ütközik a belső részen kialakított, burkolathoz csavarozott 6 darab hasáb alakú ellendarabnak. Ezután a kezelt anyag visszahull a forgó dobra, és a soron következő hasábra csapódik. A folyamatos előrehaladás során a kezelt alapanyag szerkezete roncsolódik, kristályossága csökken, így a baktériumok számára a hozzáférhető felület nő.

### 3.2.2. A labormérés eszközei

- a., Kemence
- b., Analitikai mérleg
- c., Exszikkátor
- d., Gázkromatográf
- e., Inkubátor szekrény
- f., pH mérő
- g., Rázó szitasor

*a., Kemence*

Az izzítást *Nabatherm CE 4/11/R6* típusú kemencével végeztem. A mintákat sorszámozott porcelánedényekbe mértem ki (27. ábra).



27. ábra *Nabatherm CE 4/11/R6* típusú kemence és a sorszámozott kerámia edények (Forrás: saját kép)

A 600 C<sup>0</sup>-ra történő izzítást (MSZ 318/3–79 alapján) 6 lépcsőben 100 °C-os léptetéssel végeztem a túlhevítés elkerülése végett.

*b., Analitikai mérleg*

A szárazanyag-tartalom, a szerves szárazanyag-tartalom és a kémiai oxigén igény (KOI) mérés oldatainak elkészítéséhez, továbbá a pozitív fermentációs minta mikrokristályos cellulóz kiméréséhez szükséges tömegmérést egy *Sartorius AX224* négytizedes pontosságú mérlegen végeztem (28. ábra).



28. ábra *Analitikai mérleg* (Forrás: saját kép)

c., *Exszikkátor*

A szárazanyag-tartalom és a szerves szárazanyag-tartalom mérése során a mintákkal teli tégelyek magas hőmérsékletűek. A kemencéből kivéve, a vastag falú üvegből készült exszikkátor biztosítja szobahőmérsékletre hűlésüket. A minták levegőből felvehető nedvességtartalmának elkerülését az exszikkátorban (29. ábra) levő szárítószer, a szilikagél gátolja.



29. ábra Az exszikkátor (Forrás: saját kép)

d., *Gázkromatográf*

A biogáz mintavétele *Hamilton Gastight 1710 – 100 µl*-es tüvel történt. A mérésekhez használt *DANI Master Fast Chromatograph* (30. ábra) típusú berendezés paramétereit az 10. táblázat tartalmazza.

10. táblázat Az általam használt gázkromatográf paramétereit

Megnevezés	Paraméter
Kromatográf típusa	DANI Master Fast Chromatograph
Oszlop típusa	Restek Rt-U-BOND (15 m / 0,53 mm ID / 20 µm)
Detektor típusa	FID – Flame Ionization Detector
Tű típusa	Hamilton Gastight 1710–100 µl
Alkalmazott gázok	He (4.6), H <sub>2</sub> (4.5), szintetikus levegő (20,5% O <sub>2</sub> , 79,5% N <sub>2</sub> )
Kemence hőmérsékletet	60 °C (izoterm)
Oszlopáramlási sebesség	4 ml/perc
Split ratio	1:30
Detektor hőmérséklet	200 °C
Detektoráramlási viszonyok	AUX – 25 ml/min; H <sub>2</sub> – 40 ml/min; Levegő – 280 ml/min
Mérési idő	5 perc



30. ábra A mérésekhez használt gázkromatográfiás berendezés (Forrás: saját kép)

*e., Inkubátor szekrény*

A szárazanyag-tartalom vizsgálatához (105 °C) és a fermentációhoz szükséges optimális (37°C) hőmérséklet biztosítását a MIM LP 321/3 szárítószekrény (31. ábra bal oldali kép) használatával oldottam meg. Ezzel az eszközzel száraz, meleg levegő segítségével lehet eszközöket szárítani, illetve magasabb hőfokon akár sterilizálni is.



31. ábra Az inkubátor szekrény és az inkubálást biztosító vizes kád (Forrás: saját kép)

Az egyidejű párhuzamos fermentációs reaktorok rendszerének helyigénye nagyobb volt az inkubátor szekrény űrtartalmánál. Emiatt az anaerob fermentációs kísérlet során szükség volt olyan 37 °C-on temperált vízzel teli kád bevonására, ami biztosította az inkubációs terület növelését (31. ábra jobb oldali kép). Az ebből adódó lehetséges eltéréseket a kísérlettervben blokk faktorként leellenőriztem.

*f., pH mérő*

A fermentációs vizsgálatok elején és végén a minták pH értékét a FERMAC 320 (32. ábra) típusú fermentációs bioreaktor pH mérőjével végeztem.



32. ábra A Fermac 320 pH mérője (Forrás: saját kép)

A géllal töltött pH-elektroda 12 mm átmérőjű. Pontossága 25 °C-on 4–10 pH +/-0,02 pH.

*g., Rázó szitasor*

A búzaszalma méret frakcionálását a Reutch gyártmányú rázógéppel egybekötött szitasorral végeztem (33. ábra). A szitálási folyamatot 5 percig végeztem, melynek paramétereit az 11. táblázat tartalmazza.



33. ábra Reutch rázógép a szitasorral (Forrás: saját kép)

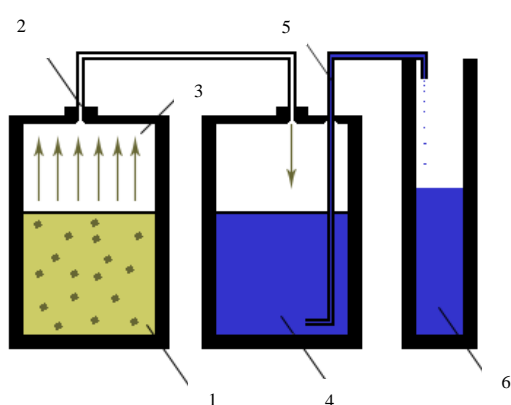
## 11. táblázat Szítási körülmények

Bemért anyagmennyiség (g):	54,0
Rázás amplitudója (mm/"g"):	300
Rázás időtartama (perc):	5
Szakaszos üzem időtartam (s):	20

### 3.3. Biogáz batch mérés leírása

A fermentációs batch eljárás során a szubsztrátumot csak egyszer – a vizsgálat kezdetén – táplálják be a rendszerbe. Emiatt nevezik szakaszos vizsgálatnak. A feltöltés után az erjesztőt lezárják és csak a kísérlet végén kerül kinyitásra. Előnye, a nagy térfogategységre vetített biogáz hozam, melynek mértéke az időben egyre csökken a további betáplálás hiánya miatt. Tehát a baktériumok lehetőségeik szerint az összes tápanyagot a vizsgálati idő alatt felemésztik. Mikor már nincs gáztermelés – legalábbis nem számottevő –, akkor az elhasznált anyagot el kell távolítani, és újra feltölteni a rendszert. Az anaerob rothasztást a *VDI 4630 Szerves anyagok fermentálása* német ajánlás alapján végeztem el.

A batch rendszernek a betáplálás minősége szerint három típusa ismert: folyékony, félszáraz és száraz eljárás. Míg a félszáraz rendszer szárazanyag tartalma 15%, addig a folyékony rendszeré csak 2–8% (szerves szárazanyag-tartalma körülbelül 40–50%), a száraz rendszer szárazanyag-tartalma pedig 25%-nál nagyobb. Mindhárom alapanyagra épülő kísérletsorozatomban folyékony eljárásként rothasztottam a szubsztrátumot.



34. ábra A batch mérés jelképes működési ábrája és fényképe (Forrás: saját kép)

1. A fermentálni kívánt szubsztrátum, 2. Polipropilén cső, 3. Gáztér, 4. MÉRŐFolyadék, 5. Szilikon cső,
6. Gázhozam mérő

A 34. ábra alapján, a 37 °C-on történő fermentáció során fejlődő gáz a gáztérből (3) a polipropilén csövön (2) keresztül a mérőfolyadékkal megtöltött tartály légterébe áramlik. A reaktor üvegekben

keletkező biogáz mennyiség változással (térfogat- és nyomásnövekedéssel) egyidejűleg a második tartályban lévő mérőfolyadék (4) a szilikon csövön (5) át a gázhozam mérőhengerbe (6) préselődik. A keletkezett biogáz térfogata megegyezik a kiszorított folyadék térfogatával, a gáz, kompresszálas hiányában, standard nyomáson, 101325 Pa-on képződik.

A szakaszos vizsgálatok előtt meg kell határozni – a térfogattól függően –, hogy milyen mennyiségű szubsztrátumot szeretnénk vizsgálni, és mennyi oltóiszap, valamint víz szükséges a reaktor feltöltéséhez. Ezek meghatározása a VDI 4630-as ajánlás alapján történt.

A betápláláshoz szükséges információk:

- fermentációs elegy térfogata (reaktoredény kapacitásának megfelelően),
- oltóiszap TS%-a (inoculum szárazanyag tartalma),
- oltóiszap oTS%-a (inoculum szerves szárazanyag tartalma),
- szubsztrátum TS%-a (a vizsgált, fermentálandó anyag szárazanyag tartalma),
- szubsztrátum oTS%-a (a vizsgált, fermentálandó anyag szerves szárazanyag tartalma).

Minden esetben a szubsztrátum fermentációjával egy időben indítani kell vakminta (negatív kontroll), és referenciaminta (pozitív kontroll) mérést is. A vakminta esetében vizsgált anyag nincs, csak az oltóiszapot kell bemérni a reaktorba. Az oltóiszap fermentációja során kapott érték kerül levonásra a degradáció végén a szubsztrátum-iszap fermentációja során kapott gázhozam értékekből. Így kapható meg tisztán, a vizsgált szubsztrátum biogáz hozama.

A pozitív kontroll használatkor a szubsztrátum mikrokristályos cellulóz (*Cellulosum Microcristallinum*). Ezen anyag szárazanyag-tartalmát és szerves szárazanyag-tartalmát a vizsgálatok előtt szintén meg kell mérni. Az oltóiszap megfelelő minőségű, ha a keletkező gáz mennyisége a 740–750 mL<sub>N</sub>/g<sub>oTS</sub> körüli értéket 80%-ban eléri a kontrol tétel. Ezek után feltételezhető, hogy a biológiailag aktív tömeg a lehetséges teljesítőképesség megfelelő szintjén van. (VDI 4630)

A beadagolt szubsztrátum és az (kontroll anyag vagy vizsgált anyag) oltóiszap szerves szárazanyag – tartalmának aránya a vizsgálatok során kisebb, mint 0,5. (VDI 4630)

A vizsgálat lépései:

1. A minta homogenizálása.
2. A vizsgált minta bemérése, a VDI 46030-as ajánlása alapján előre meghatározott mennyiségben a szubsztrátumból.
3. A VDI 46030-as ajánlása alapján, a számított mennyiségű oltóiszap bemérését követően megtörténik a reaktor üveg feltöltése vízzel a kívánt értékre.
4. Az üvegek légmentes lezárása műanyag kupakkal és szeptummal. A rendszer anaerobbá tétele 5 perces nitrogéngáz átöblítésével.
5. A vizsgálat elindításához előkészített, mintákkal teli anaerob reaktorüvegekhez a gáztérfogat mérésére alkalmas rendszer hozzá kapcsolása. Ezt követően a reaktor és a mérőegység előre beállított hőfokra (37 °C) temperált inkubátor szekrénybe helyezése. A fermentorból a gáz egy vízzel teli üvegbe áramlik, ahonnan a keletkezett gáz



mennyiségével ekvivalens mennyiségű víz kiszorítása zajlik. A harmadik üvegbe átnyomott víz térfogatának nyomon követésével meghatározható a keletkezett biogáz mennyisége.

6. A minták gáztermelésének detektálása az első héten naponta, majd hetente háromszor történik, a hőmérséklet és a légköri nyomás feljegyzésével együtt.

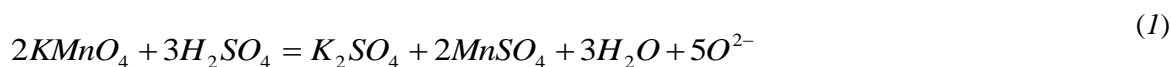
### 3.4. Gázelemzés leírása

A kvalitatív és kvantitatív elválasztási eljáráson alapuló gázkromatográfiás vizsgálatban a vivőgáz – más néven eluens –, szállítja a befecskendezett mintát. Az elválasztás során az injektorban a minta magas hőmérsékleten elpárolog, és gáz halmazállapotú lesz, ebből adódóan csak olyan anyagokat vizsgálhatunk, amelyek elpárologtathatók. A beinjektált minták az oszlopon haladnak végig adszorpciós tulajdonságaiknak megfelelő sebességgel, amelynek időbeli változását az oszlop végénél lévő detektor méri. Ennek eredményeképp kromatogramok keletkeznek, ahol a csúcsmagassághoz tartozó idő (retenciós idő) alapján azonosítható a vizsgált mintában az adott komponens, a görbe alatti terület integrálásával pedig az anyag mennyiségére kapunk kvantitatív adatot. A biogáz mintavételéhez *Hamilton Gastight 1710–100 µl*-es tűt használtam. A tűt először mintával átöblítettem, majd 50 µl-t injektáltam be a gázkromatográfiás berendezésbe. A méréseket a *DANI Master Fast Chromatograph* (Column – Restek Rt-U-BOND – 15m/0,53 mm ID/20 µm; Detector – FID – Flame Ionization Detector; értékelő szoftver: Clarity) típusú berendezésen végeztem. A kalibrációt a *Messer Hungarogáz Kft.* által egyedileg összeállított kalibrációs gázzal végeztem, mely 5,2% nitrogént, 46,7% széndioxidot, és 48,1% metánt tartalmazott.

A kísérlet indítását követően a keletkezett gázmennyiség mérésével egy időben megtörtént a gáz minőségi elemzése is.

### 3.5. KOI mérés leírása

A kémiai oxigénigény (KOI), a vízben lévő oxidálható szerves anyagok mennyiségéről ad kvantitatív adatot. Az oldott KOI utal a fermentációs tápanyag oxidálható komponenseinek elégetéséhez szükséges oxigén mennyiségre, megbízhatóan mutatva ezzel a fermentációs tápanyagtartalmát. [111] A KOI-t az 1 dm<sup>3</sup> térfogatú vízminta által redukált oxidálószerrel egyenértékű oxigén tömegeként adják meg (dimenziója: mg/dm<sup>3</sup>). Meghatározásához ismert térfogatú vízmintát oxidálnak kálium-permanganáttal, vagy kálium-dikromáttal. Méréseim során a minták kémiai oxigén igényét *MSZ ISO6060 1993-as* szabvány alapján határoztam meg kálium-permanganátos módszerrel az alábbi reakcióegyenlet alapján:



Az analitikához 100 cm<sup>3</sup> mintát használtam 50-szeres hígításban. Reagensként 0,002 M kálium-permanganát oldatot, 0,005 M nátrium-oxalát oldatot, valamint 1:2 hígítású kénsav oldatot



alkalmaztam. A kapott kálium-permanganát oldat fogyásából az alábbi képlet alapján számoltam KOI értéket:

$$KOIp = (a - b) \cdot f \cdot \frac{80}{V} \quad (2)$$

ahol  $a$  – a meghatározásnál fogyott összes  $KMnO_4$  mérőoldat térfogata ( $cm^3$ ),  $b$  – a vakpróba titrálásakor fogyott  $KMnO_4$  mérőoldat térfogata ( $cm^3$ ),  $f$  – a  $KMnO_4$  mérőoldat faktora,  $V$  – a meghatározáshoz felhasznált vízminta térfogata ( $cm^3$ ),  $80$  – az oxigén egyenérték súlyából és az 1 liter térfogatra való átszámításából adódó érték.

### 3.6. Szárazanyag és szerves szárazanyag-tartalom mérés leírása

A mérés célja a minták nedvesség tartalmának és szerves szárazanyag-tartalmának meghatározása. A pontos szárazanyag-tartalom meghatározás céljából három párhuzamos mintát használtam. A mintákat először  $105\text{ }^\circ\text{C}$ -on szárítottam az inkubátor szekrényben. Ezt követően  $600\text{ }^\circ\text{C}$ -on izzítottam a *Nabatherm CE 4/11/R6* típusú kemencében (35. ábra). A mintákat megmértem nedvesen, szárítás és izzítás után is.

A szerves szárazanyag-tartalom méréséhez használt magas  $600\text{ }^\circ\text{C}$ -os hőmérséklet miatt, a festék leég a tároló kerámiákról. A szigorú sorrend betartásának biztosítása ezért a kemence térből történő kivétel egy sorszámozott sablontálca segítségével történt.



35. ábra A sorszámozott kerámia edények a mintákkal (Forrás: saját kép)

A tömegmérést a *Sartorius AX224* négytizedes pontosságú mérlegen végeztem. A szárazanyag-tartalmat a *MSZ 318/3-79*-es szabvány alapján hajtottam végre és az alábbi egyenlettel számoltam ki:

$$\text{Szárazanyag-tartalom} = (a - b) \cdot \frac{1000}{V} \quad [\%TS] \quad (3)$$

ahol  $a$  – a tégely és a 105 °C-on szárított minta együttes térfogata (mg),  $b$  – a 105 °C-on szárított üres tégely tömege (mg),  $V$ - a bemért minta tömege (g).

Az izzítási maradék értékét az alábbi képlettel számoltam:

$$\text{Izzítási maradék} = (c - b) \cdot \frac{1000}{V} \text{ [% oTS]} \quad (4)$$

ahol  $c$  – a tégely és az izzítási maradék együttes tömege (mg),  $b$  – a 105 °C-on szárított üres tégely tömege (mg),  $V$ - a szárításhoz bemért minta tömege (g).

### 3.7. A pH mérés

Szénhidrátok esetében a biogáz összetétele kb. 50–50% metán és szén-dioxid. Könnyen bontható, így gyors illósav termelés indul, szinte azonnal. Ezzel párhuzamosan gyors a gáztermelődés, de ennek nagy része szén-dioxid. A széndioxid először a folyadékfázisba oldódik, de mivel nagy mennyiségben termelődik, ezért a folyadékfázisból a gáztérbe is jelentős hányada kerül, ott hagyva a protonokat (hidrogén-karbonáttól). Az idő múlásával elfogy a szubsztrát, és a szén-dioxid egy bizonyos hányada visszaoldódik a gáztérből a folyadékfázisba, és a metántermelésben hasznosul hidrogénnel. A szerves sav (illósav) már elfogy a rendszerből. A biogáz termelés sebessége visszaesik, összetétele jelentősen módosul. Ilyenkor a metán részaránya növekszik a biogázban. A jellegzetes pH-változás először csökkenő, aztán növekvő, majd ismét csökkenő tendenciát mutat a folyamat során. A kezdeti pH értékhez képest a kiejert fermentlé pH értéke alacsonyabb, mint a rothasztás kezdetén.

A fermentálandó szubsztrátum pH méréseit a fermentálás előtt (36. ábra) és a fermentálás lezajlása után is elvégeztem.



36. ábra A fermentlé pH mérése (Forrás: saját kép)

### 3.8. A búzaszalma szubsztrátum kísérletterve és a kísérlet leírása

A kísérlet célja a folyadéknyírás és ütközés elvén működő berendezéssel történő előkezelés hatásának vizsgálata búzaszalma fermentáció hatékonysága szempontjából. A hatékonyság, a kezelt búzaszalma fermentálása során képződött biogáz hozamának minőségi és mennyiségi növelésével mérhető.

A vizsgálatot 4 változó paraméterrel végeztem. Ha minden esetben a paraméterek hatásának értékelhetősége miatt csak egy-egy tényező változik, akkor a kísérletek magas számának következtében a vizsgálat nehezen lenne megvalósítható. Ezért alkalmaztam a kísérlettervezést. A vizsgált tényezők egyszerre történő szisztematikus változtatásával (kísérlettervezéssel), a kimenő paraméterek segítségével lehet több változó hatását vizsgálni, kevés számú kísérlet mellett.

A búzaszalma kísérlettervezés lépései:

#### 1. Probléma definiálása

Az anaerob kísérlet során vizsgált értékekre (biogáz és metánhozam) befolyásoló hatást feltételező több változó kiválasztása.

#### 2. Faktorok és szintjeinek meghatározása

- fordulatszám, (+: 2500 ford/min; -: 1600 ford/min),
- recirkuláció, (+: 9 db; -: 3 db),
- szubsztrátum szárazanyag-tartalma (+: TS= 2,5%; -: TS= 1,25%),
- szubsztrátum előkezelését megelőző áztatási idő. (+: 15óra; -: 1 óra).

Az egyes szinteket a korábban végzett elő-kísérletek eredményeinek tapasztalata alapján határoztam meg.

#### 3. Kimenő paraméter meghatározása

Minden esetben megtörtént a kezeletlen szubsztrátum anaerob degradációja is. Ennek mért értékeihez képest fejlődött biogáz és metánhozam többlet értékek a vizsgált kimenő paraméterek.

#### 4. Kísérletterv megválasztása

A faktorok két szinten kerültek meghatározásra, a linearitás ellenőrzése végett még 1 db centrumpontri értékkel beállítva. A 2. pont alapján  $2^{n-1}=2^{4-1} = 8$  db és még 1 db centrumpontri beállítás eredményezte az összesen 9 db számú kísérletből álló részfaktorterv összeállítását (ismétléssel 18 db minta).

#### 5. Kísérletek végrehajtása

A kísérlet lépéseit, a mérési eljárásokat és berendezéseket a folyamatábra (37. ábra) alapján hajtottam végre.

#### 6. Adatelemzés

Varianciaanalízis alapján MINITAB szoftver segítségével.

#### 7. Következtetések és ajánlások a mért értékek alapján kapott diagramok és egyenletek felhasználása és kiértékelése után történt.

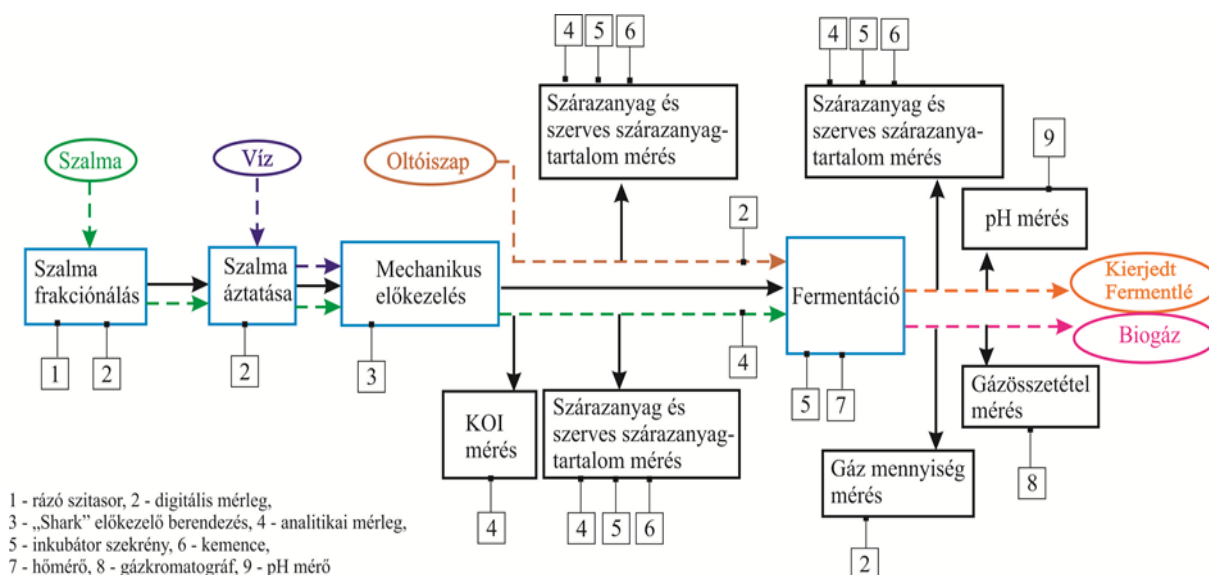
A kísérlettervezés paramétereinek változása során kapott beállításokat a 12. táblázat tartalmazza.

A  $2^{4-1}$  kísérletterv, sarokponti ismétléssel és 1 db centrumponthi ismétléssel összesen 9 db kísérleti minta adódik.

12. táblázat Búzaszalma kísérletterv mintáinak paraméterei

Shark sorszám	Sorszám	Centrum-pont	Blokkok	Fordulatszám	Recirkuláció	Áztatási idő	Száranyag-tartalom
S1	1	1	1	1600	3	1	1,25
S2	2	1	1	2900	3	1	2,5
S3	3	1	1	1600	9	1	2,5
S4	4	1	1	2900	9	1	1,25
S5	5	1	1	1600	3	15	2,5
S6	6	1	2	2900	3	15	1,25
S7	7	1	2	1600	9	15	1,25
S8	8	1	2	2900	9	15	2,5
S9	9	0	2	2250	6	8	1,875

A kísérlet anyagáramának és munkafolyamatának lépéseit a 37. ábra mutatja. A búzaszalma előkezeléseket 10 liter búzaszalma-víz szubsztrátum mennyiségén hajtottam végre (38. ábra), mert az aprítóberendezés nedves alapanyag kezelésére alkalmas. A 10 liter mennyiségű búzaszalma-víz alapanyagot az S1-S9-ig meghatározott paramétereivel kezeltem.



37. ábra A búzaszalma kísérlet anyagáramának és munkafolyamatának lépései (Forrás:saját kép)



38. ábra Shark gépbe történő szubsztrátum adagolás (Forrás: saját kép)

A szakaszos fermentációs vizsgálatok előtt mindig megtörténik a vizsgált szubsztrátum minták, az oltóiszap, valamint a reaktor feltöltéséhez szükséges víz mennyiségének meghatározása. Ennek alapján a beadagolt szubsztrátum és az oltóiszap szerves szárazanyag-tartalmának aránya a vizsgálatok során kisebb, mint 0,5.

A szubsztrátum nedves aprításon ment keresztül. A különböző beállításokkal történő kezelés hatására a búzaszalma eltérően nedvesedett. A reaktorba történő megfelelő mennyiség beméréséhez tehát szükségem volt az egyes búzaszalma-víz szuszpenzió minták szárazanyag-tartalom meghatározására. Ezt az MSZ 318/3–79-es szabvány alapján elvégeztem mind a 9 mintán. A fermentációs elegy (búzaszalma-oltóiszap) minták pontos mennyiségi összetételének bemérését követően megtörtént az anaerob fermentáció.

A kezeletlen búzaszalma fermentációs, párhuzamos mérés hozamainak átlagát tekintetem alapnak a kezelt búzaszalma minták többlet gáz és metán mennyiség értékeléséhez. Mindig az így nyert különbség értékét vizsgáltam.

A rothasztás során kapott biogáz és metánhozam eredményeit alátámasztja

- a., a búzaszalma-víz szuszpenzió egyes mintáinak KOI értéke,
- b., a búzaszalma-víz szuszpenzió előkezelés hatására a minták nedvesedési értéke,
- c., a fermentált visszamaradó lé pH értéke.

Ezen mérések a 37. ábrán látható folyamatábrában kerültek feltüntetésre.

### 3.9. A szennyvíziszap fermentlé és mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum fermentációs kísérletterve és a kísérlet leírása

A kísérlet célja a folyadéknyírás és ütközés elvén működő berendezéssel történő előkezelés hatásának vizsgálata a fermentlevek további, utófermentáció hatékonysága céljából. A hatékonyság, a kezelt fermentlevek utófermentálása során képződött biogáz hozamának minőségi és mennyiségi növelésével mérhető.



39. ábra A fermentlé Shark-os kezelése (Forrás: saját kép)

A szennyvíztelepről származó fermentlevet (délpesti) és a mezőgazdasági fermentlevet (dömsödi) ugyanazzal a kísérletsorozattal vizsgáltam meg (39. ábra).

A szennyvíziszap fermentlé és mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum kísérlettervezés lépései:

1. Probléma definiálása

Az anaerob kísérlet során vizsgált értékekre (biogáz és metánhozam) befolyásoló hatást feltételező több változó kiválasztása

2. Faktorok és szintjeinek meghatározása

– fordulatszám, (+: 2500 ford/min; -: 1600 ford/min)

– recirkuláció, (+ 3db; -: 9db)

Az egyes szinteket a korábban végzett elő-kísérletek eredményeinek tapasztalata alapján határoztam meg.

3. Kimenő paraméter meghatározása

Minden esetben megtörtént a kezeletlen szubsztrátum anaerob degradációja is. Ennek mért értékeihez képest fejlődött biogáz és metánhozam értékek a vizsgált kimenő paraméterek.

4. Kísérletterv megválasztása

A faktorok két szinten kerültek meghatározásra. A linearitás ellenőrzése végett még 1 db centrumponti értékkel beállítva. A 2. pont alapján  $2^n=2^2=4$ db és még 1 db centrumponti

beállítás eredményezte az összesen 5 db számú teljes terv összeállítását (ismétléssel 10 db minta)

5. Kísérletek végrehajtása

A kísérlet lépéseit, a mérési eljárásokat és berendezéseket a folyamatábra (40. ábra) alapján hajtottam végre.

6. Adatelemzés

Varianciaanalízis elvégzése MINITAB szoftver segítségével.

7. Következtetések és ajánlások a mért értékek alapján kapott diagramok és egyenletek felhasználása és kiértékelése után történt.

A kísérletterv vizsgálandó paramétereit alapján a nedves aprító berendezés beállításait a 13. táblázat tartalmazza.

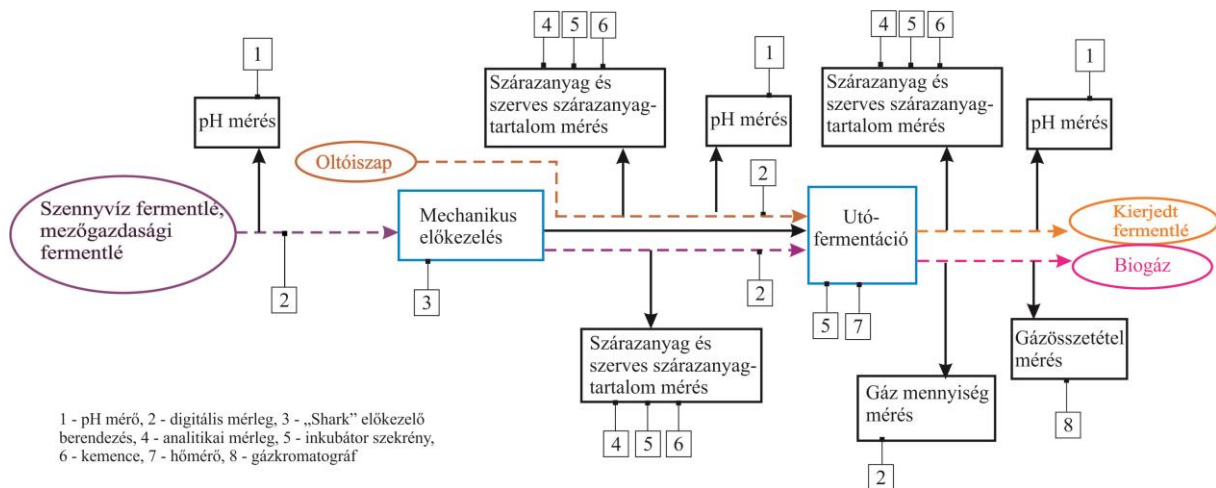
**13. táblázat Fermentlé kísérletterv mintáinak paramétereit**

Shark sorszám	Izlap típusa	Fordulatszám	Recirkuláció
S1	délpesti	2500	3
S2	délpesti	2500	9
S3	délpesti	1600	3
S4	délpesti	1600	9
S5 (centrumpont)	délpesti	2050	6
kezeletlen szennyvíz fermentlé	délpesti	0	0
S1	dömsödi	2500	3
S2	dömsödi	2500	9
S3	dömsödi	1600	3
S4	dömsödi	1600	9
S5 (centrumpont)	dömsödi	2050	6
kezeletlen mezőgazdasági fermentlé	dömsödi	0	0

A kísérlettervben minden esetben párhuzamos mintákkal és egy centrumpontra beállítással dolgoztam.

Mindkét típusú, 8 liter mennyiségű szubsztrátummal elvégeztem az S1-S5-ig paraméterekkel beállított előkezeléseket (38. ábra). Ezt követően a VDI 4630-as irányelvben meghatározott fermentációs elegy pontos mennyiségi bemérését követően ez esetben is elvégeztem a minták fermentációját.

A kezeletlen fermentlevek utófermentációs, párhuzamos mérés hozamainak átlagát tekintettem alapnak a kezelt minták képződött többletgáz és metán mennyiségének értékeléséhez. Mindig az így nyert különbség értékét vizsgáltam.



40. ábra A fermentlé kísérlet anyagáramának és munkafolyamatának lépései (Forrás: saját kép)

A rothasztás során kapott biogáz és metánhozam eredményeit alátámasztja az utófermentált visszamaradó lé pH, TS és oTS értékei. Ezen mérések a folyamatábrában is feltüntetésre kerültek (40. ábra).



## 4. A kísérletek eredményei

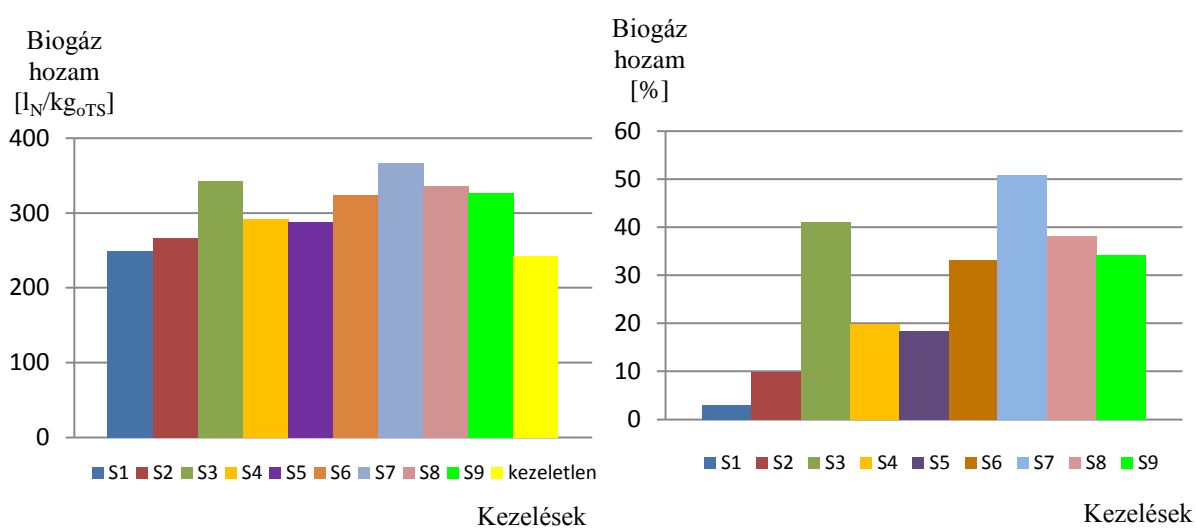
### 4.1. Búzaszalma fermentációjának kísérleti eredményei

#### 4.1.1. A búzaszalma szubsztrátum biogáz és metánhozam eredményei

##### a., Biogáz hozam

A búzaszalma szubsztrátum fermentációs vizsgálatot négy ismételt kísérlet sorozattal végeztem, minden esetben párhuzamos mintákkal. Az összetartozó, párhuzamos eredmények átlagát vettem figyelembe az alábbi megállapítások során. A 16 napig tartó szakaszos fermentációt a 3.3 fejezet, a szárazanyag és a szerves szárazanyag-tartalom mérést a 3.6 fejezet, a gázösszetétel meghatározását a 3.4 fejezet alapján végeztem.

Az 41. ábra diagramjai a búzaszalma szubsztrátum biogáz hozamok kapott értékeit, valamint a kezeletlen mintával nyert biogáz hozamához viszonyított %-os eltérését mutatják.



41. ábra A búzaszalma szubsztrátum minták egyes biogáz hozam értékei és a kezeletlen minta biogáz hozam értékeihez mért %-os eltérései

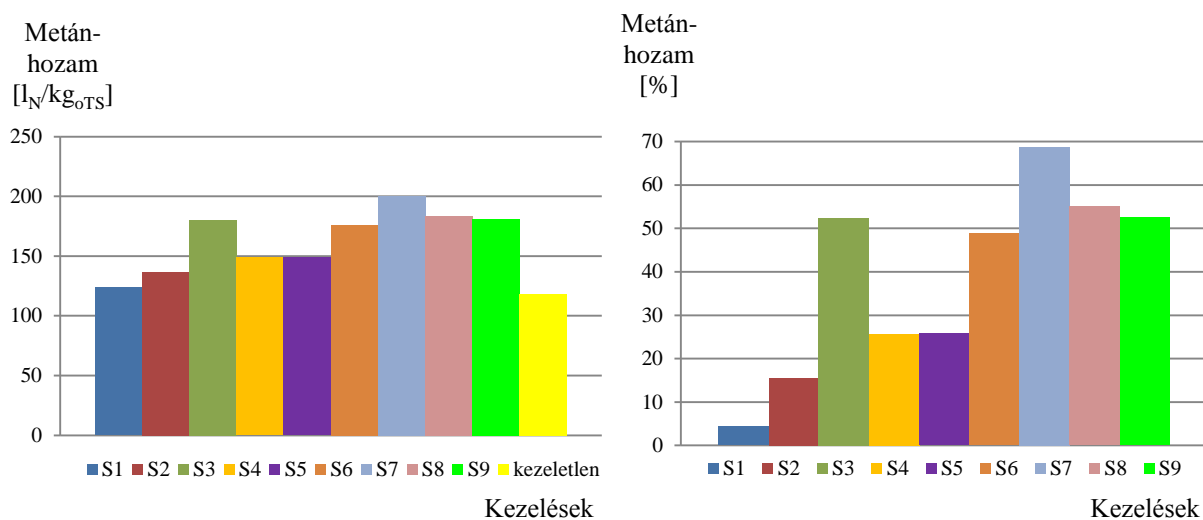
A kezeletlen búzaszalma–víz szubsztrátum minta, a dömsödi biogáz telep fermentorával beoltott inoculummal rothasztva 16 nap után  $243 l_N/kg_{oTS}$  biogáz és  $118,8 l_N/kg_{oTS}$  metánhozamot ért el.

A biogáz hozam értéke megfelel a Kaltwasser [112] által feltüntetett adatok ( $\sim 200$ – $300 l_N/kg_{oTS}$ ) közéértékének.

A kezelt minták mérési eredményeként kapott biogáz hozam értékei  $250$ – $370 l_N/kg_{oTS}$  közé estek. A kezeletlen mintához képest a kezelt minta gázhozamok  $4$ – $50$ -os többlet eltérést mutattak. Az S7 (1600 fordulat/min; 9 recirkuláció; 15 óra; 1,25% TS) mért mennyisége mutatkozott a legjobbnak.

## b., Metánhozam

A 42. ábrán látható diagramok a metánhozamok kapott értékeit, valamint a kezeletlen mintával elért metánértékhez viszonyított %-os eltérését mutatják.



42. ábra A búzaszalma szubsztrátum minták gázhozamai és a kezeletlen minta biogáz hozam értékeihez mért %-os eltérései

A rothasztott minták kapott metánhozam értékei 120–200  $l_N/kg_{OTS}$  közé estek. A kezeletlen mintához képest (118,5  $l_N/kg_{OTS}$ ) a metánhozamok 4–70%-os többlet eltérést mutattak. Az S7 jelű kezelt minta (1600 fordulat/min; 9 recirkuláció; 15 óra; 1,25% TS) mért mennyisége adta a legnagyobb pozitív eltérést a kezeletlen minta metánhozamához képest.

### 4.1.2. A degradáció időbeli lefutása

A 4.1.1 fejezetben megállapított kezeletlen búzaszalma szubsztrátum 243  $l_N/kg_{OTS}$  biogáz és 118,8  $l_N/kg_{OTS}$  metánhozamát a fermentáció 16. napján érte el. A kezelt minták a degradáció során ezt az értéket a hidraulikus tartózkodási idejük során előbb elérték.

14. táblázat Az egyes kezelések időbeli vizsgálata

Shark berendezéssel kezelt minta sorszáma		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	Kezeletlen
Degradációs idő, amikor a minta eléri a 243 $l_N/kg_{OTS}$ biogáz és 118,8 $l_N/kg_{OTS}$ metán termelt értéket (nap)	Biogáz	14	12	6	7	8	7	6	6	6	16
	Metán	12	9	6	8	8	6	6	5	6	16

Az 1 órás áztatási idő eltelté után kezelt minták S1, S2, S3, S4 biogáz hozama 6–14 nap alatt érte el a kezeletlen minta biogáz hozam (243  $l_N/kg_{OTS}$ ) értékét (14. táblázat). A 15 órás áztatási idő után kezelt szubsztrátumok S5, S6, S7, S8, S9 ezt az értéket hamarabb, 6–8 nap elteltével érték el. A kezeletlen minta metánhozam (118,5  $l_N/kg_{OTS}$ ) értékének elérésére is megállapítható ugyanez az összefüggés,

miszerint a S1, S2, S3, S4 esetében 6–12 napra, míg a S5, S6, S7, S8 a kijelölt hozam értékét 5–8 napra teljesítette.

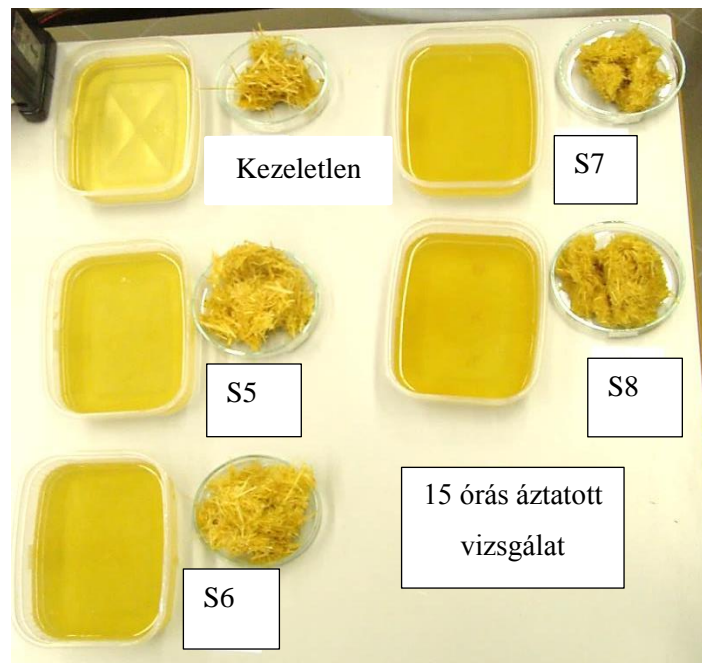
Az S3 (1600 fordulat/min; 9recirkuláció; 1 óra; 2,5% TS), az S7 (1600 fordulat/min; 9recirkuláció; 15 óra; 1,25% TS) az S8 (2900 fordulat/min; 9recirkuláció; 15 óra; 2,5% TS) és az S9 (2050 fordulat/min; 6recirkuláció; 8 óra; 1,75% TS) jellel kezelt minták érték el leghamarabb a kezeletlen minta által termelt értékeket.

#### 4.1.3. Az eredmények igazolása

##### a., A kezelt búzaszalma–víz szubsztrátum nedvesedésének meghatározása

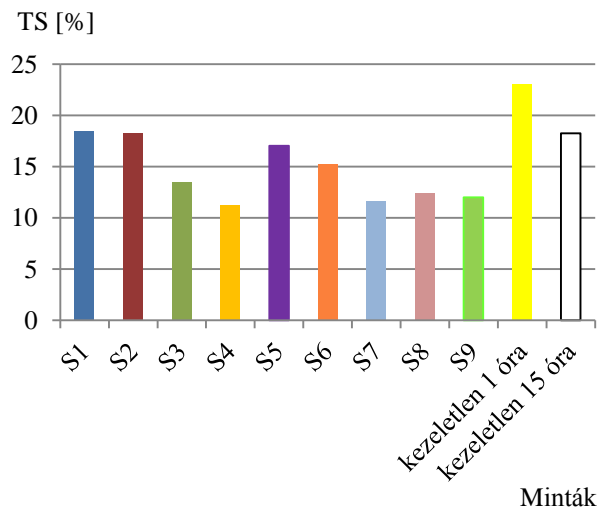
A 10 liter mennyiségű búzaszalma alapanyagot az S1-S9-ig meghatározott paramétereivel előkezelttem. Ezt követően 2 mm lyukátmérővel rendelkező szitán átszűrve vizsgáltam a szalmának és a szalma-víz szuszpenzió vizes fázisának szárazanyag és szerves szárazanyag-tartalmát.

A szárazanyag-tartalom és a szerves szárazanyag-tartalom meghatározását az MSZ 318/3–79-es szabvány alapján végeztem. A kezeletlen alapanyag és a kezelt alapanyag vízbe oldódó szerves szárazanyag-tartalom különbsége utal a rothasztási határfok hatékonyságára. Mivel az optimalizálás paramétereinek közé tartozik az áztatási paraméter, ezért az összehasonlíthatóság miatt, a kezeletlen mintának az 1 órára beáztatott és a 15 órára beáztatott szalma nedvesedését vettem alapul.



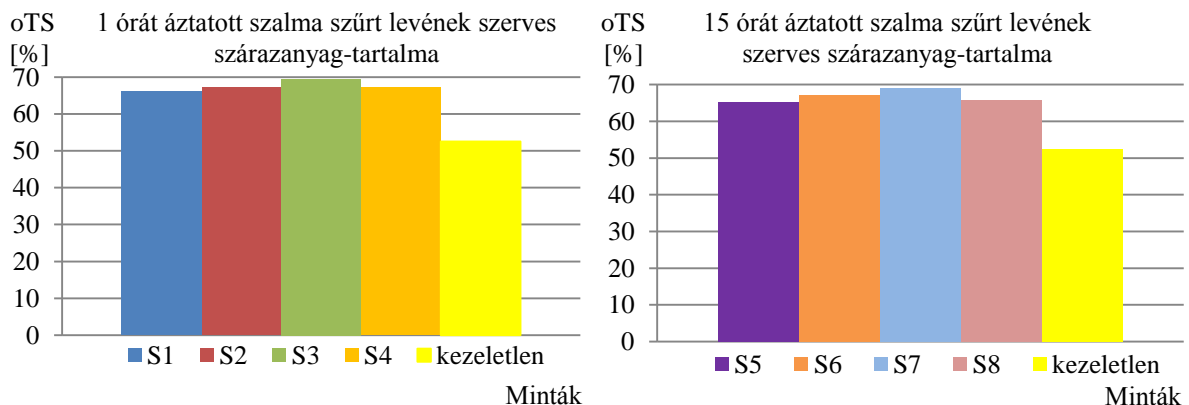
43. ábra Szalma-víz szuszpenzió nedvesedési vizsgálata (Forrás: saját kép)

Szabad szemmel is látható, hogy a szalma-víz szuszpenzió vizes fázisa jóval kevésbé áttetsző a kezelt, mint a kezeletlen minta nedveség vizsgálata során (43. ábra).



44. ábra A kezelt szalma-víz minták leszűrt szalma szárazanyag-tartalom értékei

A kezeletlen 1 órát és a kezeletlen 15 órát áztatott szalma szárazanyag-tartalma nagyobb, mint a hasonló áztatási idővel beáztatott, majd Shark kezelésnek kitett szalma szárazanyag-tartalom értéke. A legnagyobb értéket az S3 (1600 fordulat/min; 9recirkuláció; 1 óra; 2,5% TS) és S7 (1600 fordulat/min; 9 recirkuláció; 15 óra; 1,25% TS) érte el (44. ábra).



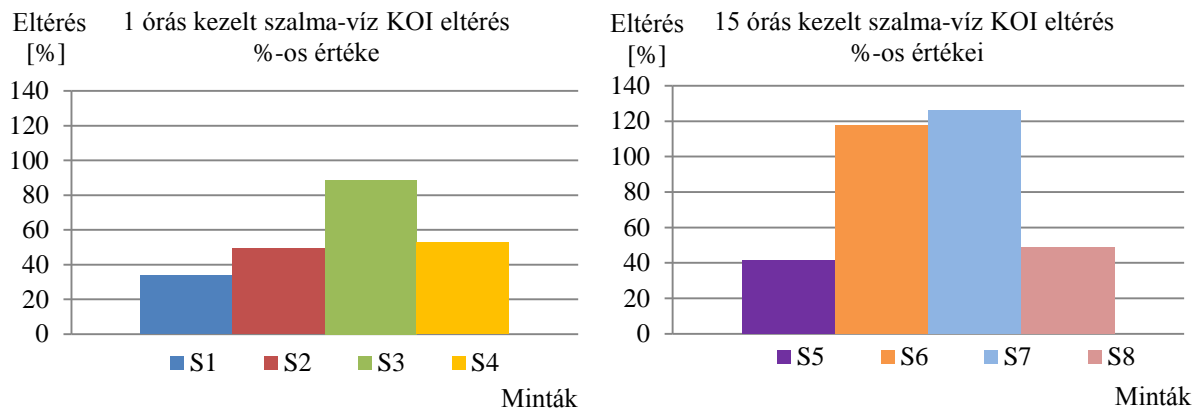
45. ábra A kezeléseket után leszűrt búzaszalma levének szerves szárazanyag-tartalom értékei

A búzaszalma-víz szuszpenzió vizes fázisában oldódó szerves szárazanyag-tartalom a kezelt minta esetében átlagosan mintegy 10% növekedést mutatott a kezeletlen minta vizes fázisának oTS%-os tartalmához képest (45. ábra). A kezeletlen alapanyag és a kezelt alapanyag vízbe oldódó szerves szárazanyag-tartalom különbsége utal a rothasztási hatások hatékonyságára is.

*b., A kezelt búzaszalma szubsztrátum vizes fázisának KOI mérése*

A kezelt búzaszalma minták vizes fázisát leszűrve vizsgáltam a levek egyes KOI értékeit a 3.5 fejezetben leírtak alapján. A vízbe oldódó szerves anyag mennyisége egyenes arányban van a

rothasztási hatékonyság értékével. [113] A különbségeket mindig a hasonló szárazanyag-tartalmú és megegyező áztatási idővel rendelkező kezeletlen víz-szalma minta KOI értékével hasonlítottam össze.

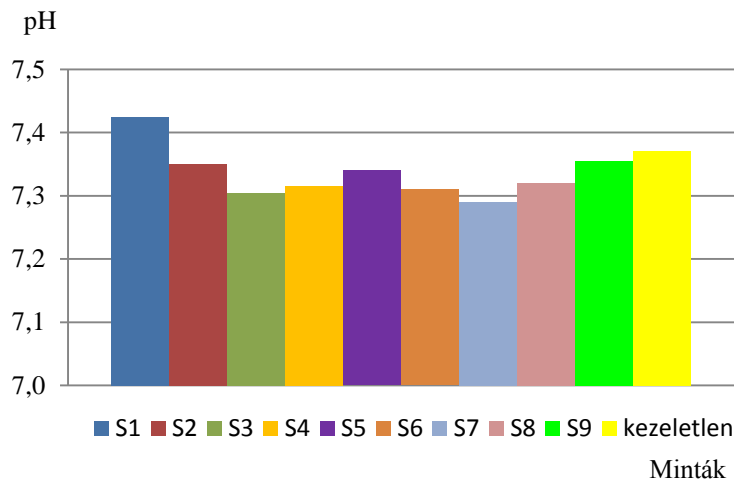


46. ábra Az egyes kezelések KOI érték eltérései a kezeletlen minta KOI értékéhez képest

A kezeletlen alapanyaghoz képest a KOI értékek 30 és 125%-os eltérést mutattak (46. ábra). Az S7 (1600 fordulat/min; 9 recirkuláció; 15 óra; 1,25% TS) jelű minta mért mennyiségei mutatták a legnagyobb pozitív KOI eltérés értéket.

#### c., Visszamaradó fermentlé pH érték meghatározása

Megvizsgáltam a fermentáció végén kapott visszamaradó fermentlé kémiai változását.



47. ábra A búzaszalma fermentációját követő pH értékek

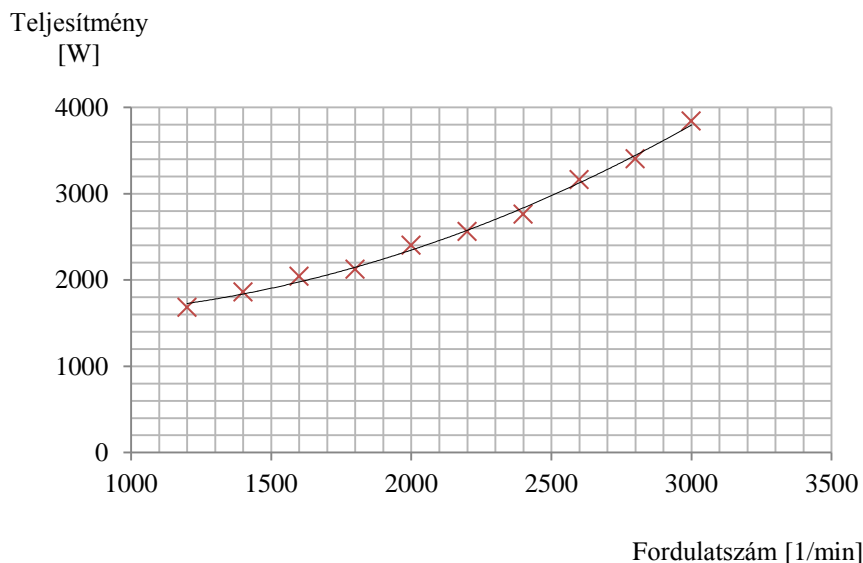
A mért pH = 7,29–7,43 értékek igazolják, hogy a fermentáció során a szubsztrátum rothasztása sikeres volt (47. ábra). Az anaerob körülmények biztosítása megtörtént, túlzott elsavasodás egyik esetben sem volt észlelhető.

#### 4.1.4. Energiamérleg

Elvégeztem az energiámérleg vizsgálatát is a búzaszalma szubsztrátum S1-S9 minták fermentációja során kapott metánhozam eredményeivel.

Az egyes kezelések során mért metán értéket (15. táblázat 1. és 2. sor)  $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{oTS}}$ -ról átváltottam  $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{oTS}}$  értékre (15. táblázat 3. sor). Ebben az esetben a metán fűtőértékét [114]  $35,79 \text{ MJ}/\text{m}^3$ -rel vettem figyelembe. Ezt követően meghatároztam a tisztán kezeléssel nyert, termelődött metán és a kezeletlen metán különbségét (15. táblázat 4. sor) ( $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ ).

A berendezés  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  áramlási mennyiségig képes megfelelően üzemelni. Mivel az előkezelést  $3 \text{ m}^3/\text{h}$  átfolyással végeztem erre a paraméterre határoztam meg az  $1 \text{ kg}_{\text{oTS}}$  szalma aprítási idejét 1,25% és 2,5% szalma-víz szárazanyag-tartalom esetén (15. táblázat 5. sor). A gépegység működési, energiafogyasztási megadott paramétereit teljesítménymérő segítségével ellenőriztem (48. ábra). Ez alapján a 7. sorban meghatároztam a kísérlettervezés során meghatározott fordulatszám faktor egyes szintjeinek (1600; 2050; 2900 fordulat/min) megfelelő fogyasztás értéket. A 9. sorban található  $1 \text{ kg}_{\text{oTS}}$  tömegű szalma aprításának teljesítményigényét, a vizsgált fordulatszámhoz tartozó teljesítményigény és recirkuláció (3; 6; 9) értékek függvényében határoztam meg (8. sor).



48. ábra A Shark berendezés teljesítménye  $3 \text{ m}^3/\text{h}$  üzemelés során (Forrás:saját mérés alapján)

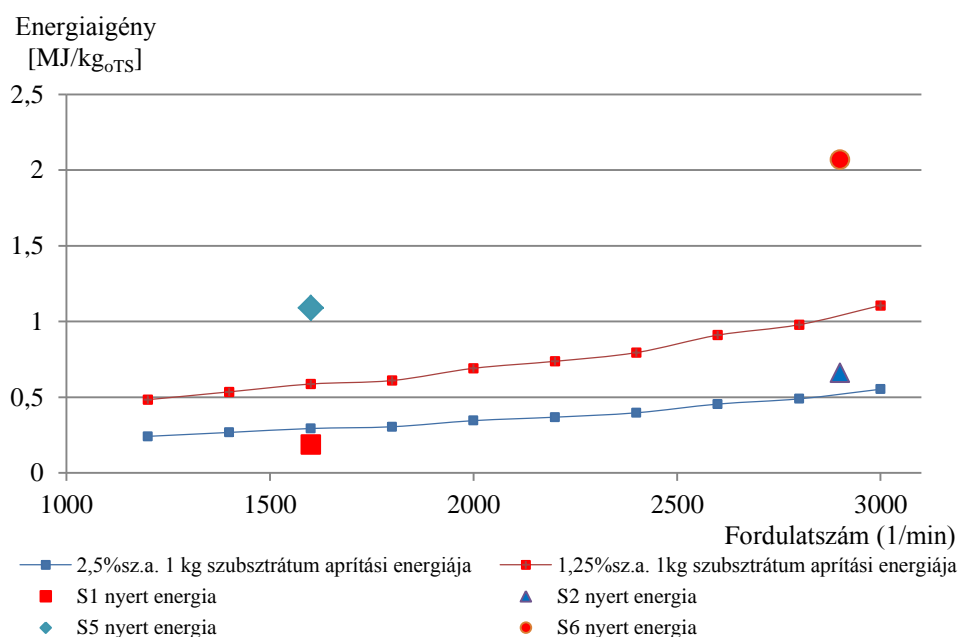
A kapott értékeket átszámoltam (15. táblázat 10. sor)  $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{oTS}}$ -re, hogy összemérhető legyen a tisztán aprítással kapott metántöbblet értékekkel (15. táblázat 11. sor).

Végül meghatároztam az aprítási eljárással bevitt és az abból nyert energia arányát (15. táblázat 12. sor).

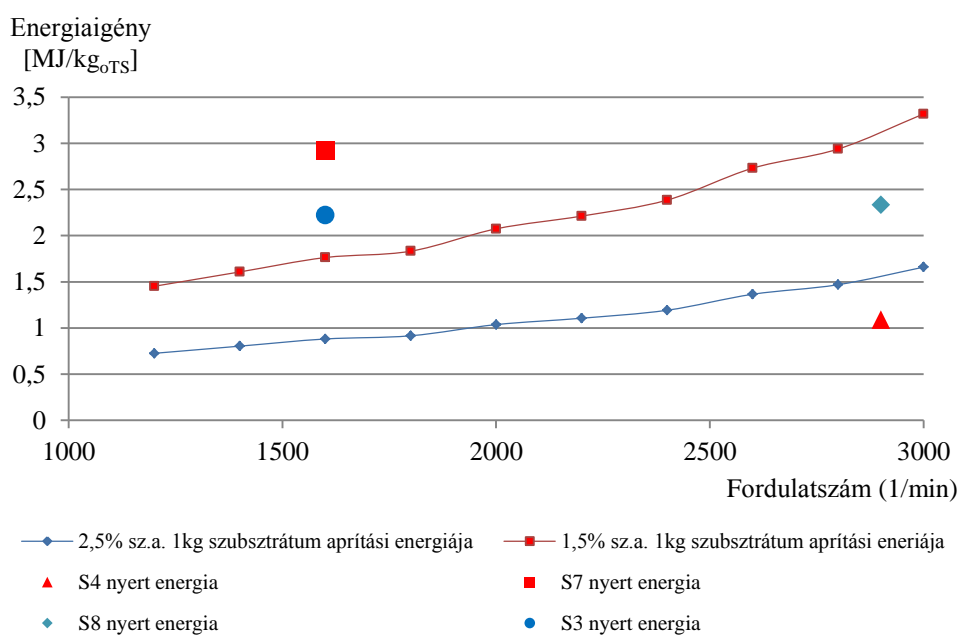
15. táblázat A búzaszalma fermentációs mintáinak energiamérleg

	Minták száma	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	kezeletlen
1	Minták átlag metánhozam [ml/g <sub>oTS</sub> ]	123,71	136,95	180,56	148,89	148,97	176,31	200,06	183,69	180,70	118,48
2	Minták átlag metánhozam [m <sup>3</sup> /kg <sub>oTS</sub> ]	0,12	0,14	0,18	0,15	0,15	0,18	0,20	0,18	0,18	0,12
3	Termelődött metán energia értéke [MJ/kg <sub>oTS</sub> ]	4,43	4,90	6,46	5,33	5,33	6,31	7,16	6,57	6,47	4,24
4	Kezelt és kezeletlen minta termelődött metán energia különbsége [MJ/kg <sub>oTS</sub> ]	0,19	0,66	2,22	1,09	1,09	2,07	2,92	2,33	2,23	0,00
5	Az aprítás ideje [s/kg <sub>oTS</sub> ]	96	48	48	96	48	96	96	48	72	
6	Az aprítás ideje [h/kg <sub>oTS</sub> ]	0,0267	0,0133	0,0133	0,0267	0,0133	0,0267	0,0267	0,0133	0,0200	
7	Adott fordulatszámon felvett teljesítmény [kW]	2,04	3,62	2,04	3,62	2,04	3,62	2,04	3,62	2,56	
8	Recirkuláció száma	3	3	9	9	3	3	9	9	6	
9	1kg <sub>oTS</sub> szalma aprításának energiaigénye adott fordulatszámon és recirkulációval [kWh/kg <sub>oTS</sub> ]	0,17	0,15	0,26	0,91	0,09	0,30	0,51	0,45	0,32	
10	Aprítási energia [MJ/kg <sub>oTS</sub> ]	0,61	0,54	0,92	3,27	0,31	1,09	1,84	1,63	1,15	
11	Energia nyereség [MJ/kg <sub>oTS</sub> ]	-0,43	0,12	1,30	-2,18	0,78	0,98	1,08	0,70	1,07	
12	Bevitt és kapott energia aránya		0,21	1,41		2,56	0,90	0,59	0,43	0,93	

Pozitív energiamérleget az S2, S3, S5, S6, S7, S8, S9 esetében kaptam. A bevitt és a kapott energia arányának megfelelő legjobb értéket az S5 (1600 fordulat/min; 3 recirkuláció; 15 óra; 2,5% TS) paraméterrel rendelkező beállítás érte el búzaszalma szubsztrátum esetén.



49. ábra A búzaszalma fermentációs energiamérlege háromszoros recirkuláció esetén



50. ábra A búzaszalma fermentációs energiamérlege kilencszeres recirkuláció esetén

A könnyebb láthatóság kedvéért ábrázoltam diagramban is a 3m<sup>3</sup>/h átfolyási mennyiséggel üzemeltetett berendezés energiamérleg eredményeit, külön vizsgálva a 3 és 9 – szeres recirkulációkat (49. és 50. ábra). Az ábrákon folytonos vonallal TS = 2,5% (kék) és TS = 1,25% (piros) 1 kg tömegű alapanyagra vonatkoztatott felvett energia értékei láthatók a fordulatszám függvényében. A diagramban jelzett konkrét pontok pedig a kísérlettervezés paramétereit alapján kezelt minták fermentációjával nyert metántöbblet energia értékét jelölik, az adott fordulatszámon (1600 és 2900 fordulat/min). A konkrét ponttal megegyező színnel jelzett vonal egymáshoz viszonyított helyzete

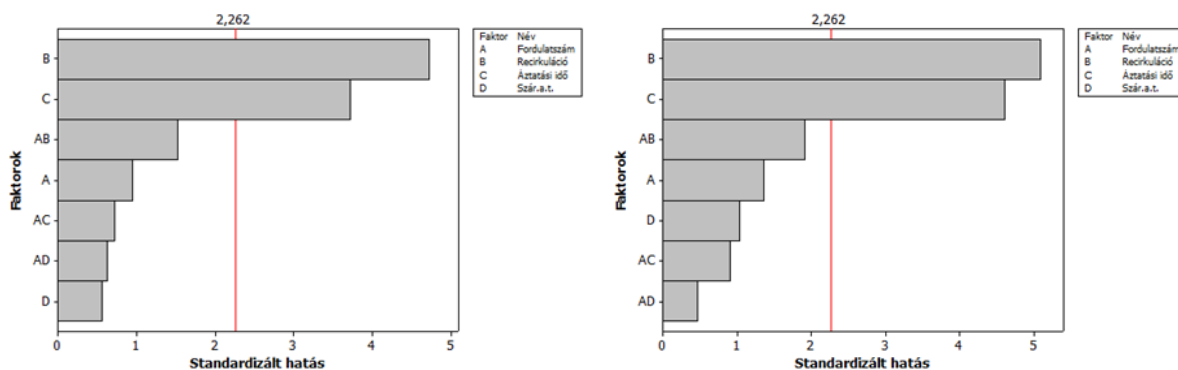


jelöli a kezeléssel felhasznált és annak hatására nyert energia egymáshoz viszonyított értékét. Az S1 és S4 értékekkel beállított kezelések nyert energia értéke a kezelés energiaigényének jelleggörbéje alatt helyezkedik el. Az energiamérleg ebben a két esetben negatív értékű. A többi vizsgált minta paramétereinek beállításával történő kezelés energiamérlege pozitív.

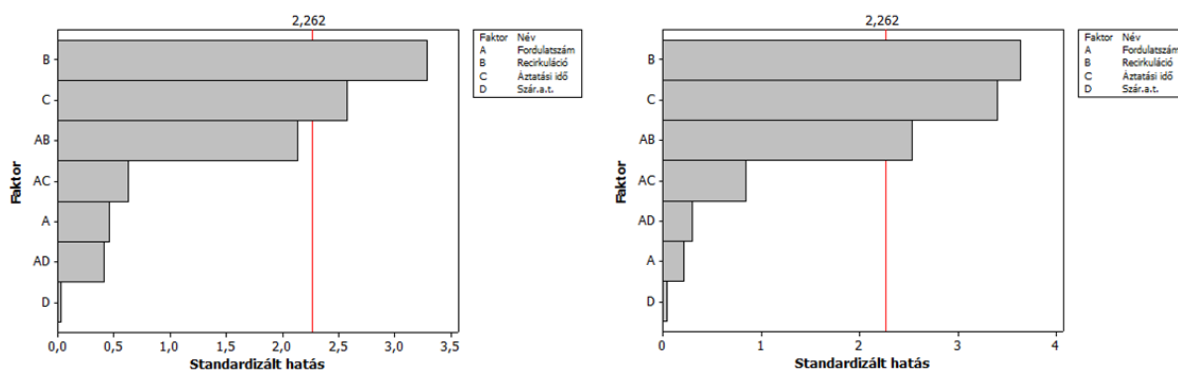
#### 4.1.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálata búzaszalma szubsztrátum esetén

A faktorok hatásának elemzése ANOVA módszerrel történt. A faktorok hatásának megállapításait MINITAB statisztikai szoftverrel értékeltem ki, 95%-os szignifikancia szinten.

A degradáció hatékonyságát a kísérlet 5. és 16. napján vizsgáltam a kezeletlen mintához képest mért biogáz- és metántöbbletek alapján. Az elemzés során kapott Pareto diagramok az egyes faktorok hatásait ábrázolják (50. és 51. ábra). Az kiértékelés során pirossal megadott értékhatáron túl lépő faktoroknak van hatása a vizsgált eredményre.

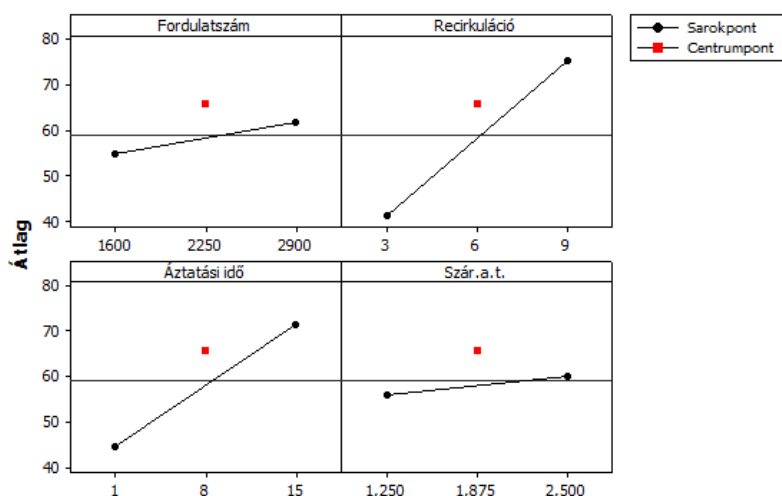


51. ábra Biogáz és metánhozam többlet Pareto diagramjai a búzaszalma fermentáció 5. napján

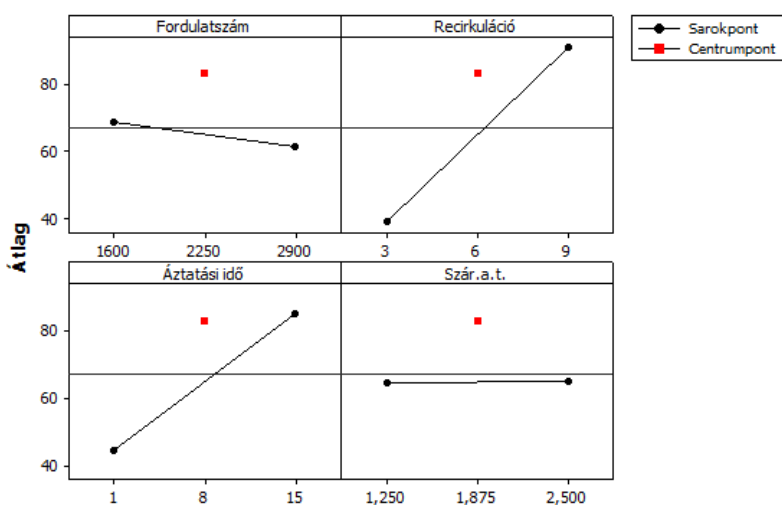


52. ábra Biogáz és metánhozam többlet Pareto diagramjai a búzaszalma fermentáció 16. napján

- Mind a négy esetben a recirkuláció volt a legnagyobb hatással a többlet értékre (51–52. ábra). A recirkuláció számának növekedésével a kihozatal minden esetben nőtt. A kezelés idejével arányosan nő a rothasztási hatékonyság.
- Minden esetben (95%-os szinten) szignifikáns hatásként jelentkezett az áztatási idő hatása, amelynél az áztatási idő növekedésével a kihozatal nőtt, de kisebb mértékben, mint a recirkuláció esetén.
- A fordulatszám – recirkuláció együttes hatása a metánhozam 16. napján látszik csak a metántartalomra befolyásoló tényezőként.

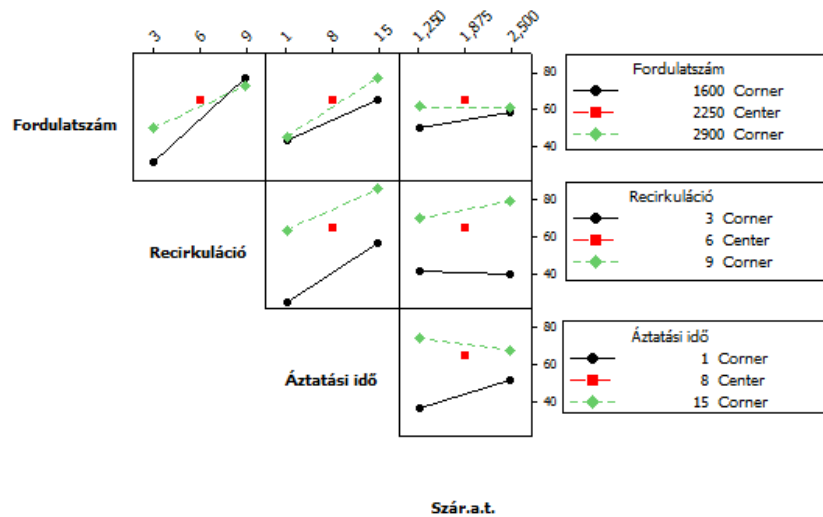


53. ábra A búzaszalma fermentáció 5. nap utáni főhatások gáz (és metán) hozam többlet alapján

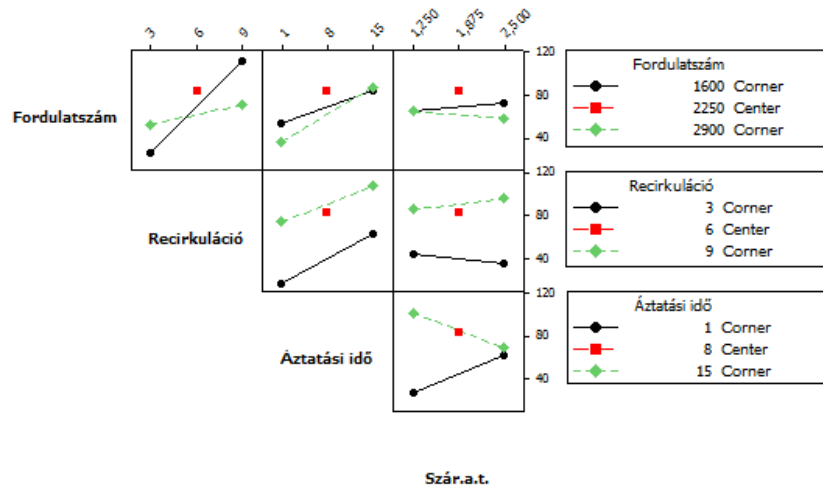


54. ábra A búzaszalma fermentáció 16. nap utáni főhatások gáz (és metán) hozam többlet alapján

A fordulatszám növekedésével a gázhozam és a metánhozam nő az 5. nap elteltével, viszont a 16. napon már az összefüggés fordított (53. és 54. ábra), de a hatás nem szignifikáns. Ennek oka, hogy a nagy recirkuláció gyors hidrolízissel jár, a degradáció hamarabb végbe megy. A rothasztási folyamat végére a reakció ennek megfelelően lelassul.



55. ábra A búzaszalma fermentáció 5. nap utáni keresztthatások gáz (és metán) hozam többlet alapján

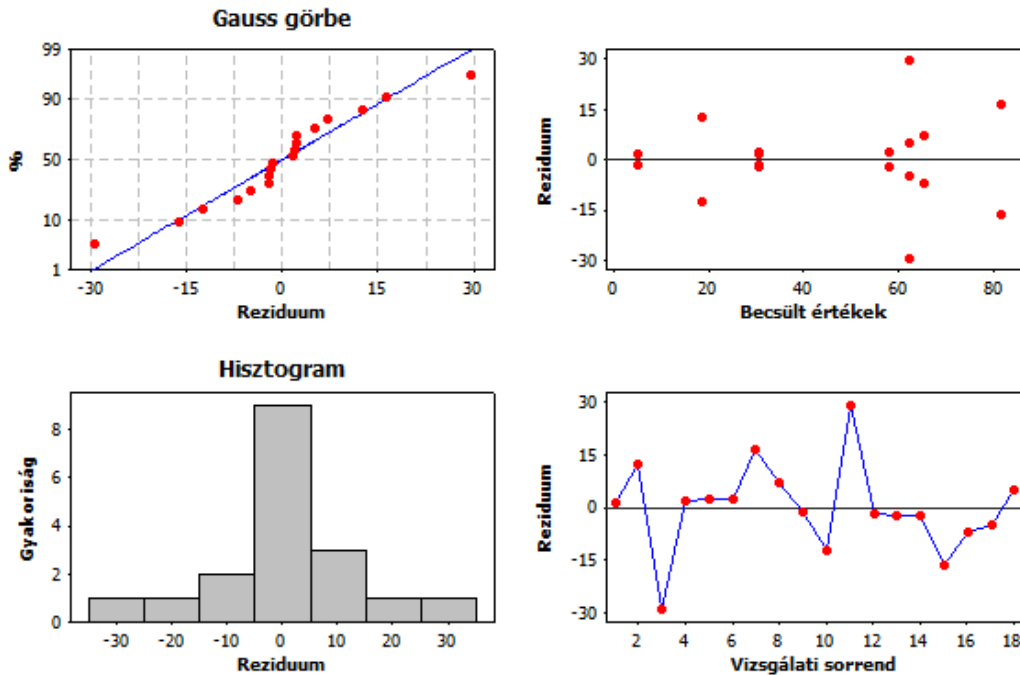


56. ábra A búzaszalma fermentáció 16. nap utáni keresztthatások gáz (és metán) hozam többlet alapján

- A gáztöbblet és a metántöbblet értékelésekor a keresztthatások ábrái mindkét esetben megegyeznek, azonosnak mutatkoznak.
- A keresztthatások közül némely esetben szignifikánsan megjelenik a fordulatszám és a recirkuláció kölcsönhatása. [113] Az idő előre haladtával a metán kibocsátás vizsgálatakor

megállapítható, hogy a kölcsönhatás befolyása növekszik, és 16 napos adatsor esetén már szignifikánsnak (95%-os szinten) mutatkozik (56. és 56. ábra).

- A kis recirkuláció – nagy fordulatszám, valamint nagy recirkuláció – kis fordulatszám együttes beállítások mellett az aprítás magas biogáz hozam többletet eredményez.
- A kezelt minták kis szárazanyag-tartalom esetén nagyobb áztatási időt igényelnek; nagy szárazanyag-tartalom esetén nem befolyásolja az áztatási idő.



57. ábra Az ANOVA elemzés alkalmazhatóságának igazolása (16. nap metánhozam többlet)

Az Anova elemzés reziduumaik általános értékelése (4. számú melléklet):

- Az inkubációs körülményeket a szárítószekevény és a vizes kád biztosította. A statisztikai program segítségével megvizsgáltam, hogy az eltérő helyen végzett fermentáció, befolyásoló hatással van-e a többlet hozam eredmények várható értékeire. Minden esetben a Blokk faktorhoz tartozó  $p$ - érték nagyobb, mint 0,05; ezért nincs hatása a mérési eredményeknek arra, hogy melyik típusú vizsgálattal történt a meghatározás.
- Centrum pont: a statisztikai próba eredményeként a  $p$ - érték minden esetben nagyobb, mint 0,05; ezért 95%-os szinten az összefüggések a gáz/metánhozam és a beállított faktorok között lineárisnak tekinthetők.
- A normál eloszlás pontjai ráilleszkednek az egyenesre.
- A Gauss eloszlás 0 körül helyezkedik el, véletlenszerűek (57. ábra).
- A különbség pontok (értékek) szórása összességében  $\pm 20 \text{ I}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$  értéknek felelnek meg.
- Az  $R^2 = 76,5$ - és  $82\%$  között vesz fel értéket a biogáz hozam és a metánhozam 16. napján.

Tehát a statisztikai elemzés megfelel a kísérletsorozat paramétereinek.

A regressziós egyenletben szereplő biogáz és metánhozam többlet befolyásoló faktorok együtthatóit a MINITAB szoftver segítségével határoztam meg.

A folyadéknyíró és ütközéses elven működő berendezéssel kezelt búzaszalma szubsztrátum anaerob rothasztása során termelt biogáz többlet várható értékének becsült regressziós függvénye:

$$16nap\_gáztöbblet = -127 + 0,0525 \cdot n + 28,13 \cdot R + 0,44 \cdot t + 18,409 \cdot TS - 0,00865n \cdot R + 0,00110n \cdot t - 0,00803n \cdot TS \quad (5)$$

A folyadéknyíró és ütközéses elven működő berendezéssel kezelt búzaszalma szubsztrátum anaerob rothasztása során termelt metántöbblet várható értékének becsült regressziós függvénye:

$$16nap\_metántöbblet = -75,9 + 0,0322 \cdot n + 18,07 \cdot R + 0,30 \cdot t + 7,6 \cdot TS - 0,00568n \cdot R + 0,000811n \cdot t - 0,00324n \cdot TS \quad (6)$$

ahol,  $n$  – a fordulatszám értéke,

$R$  – a recirkuláció száma,

$TS$  – a szárazanyag-tartalom értéke,

$t$  – az áztatási idő,

$n \cdot R$  – a fordulatszám – recirkuláció együttes hatása,

$n \cdot t$  – a fordulatszám – áztatási idő együttes hatása,

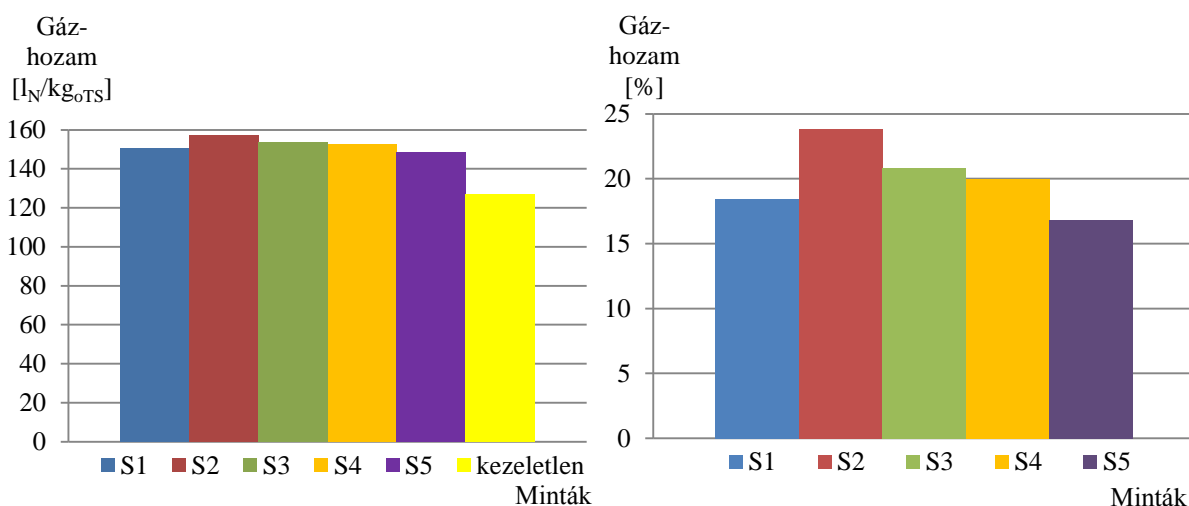
$n \cdot TS$  – a fordulatszám – szárazanyag-tartalom együttes hatása.

## 4.2. Szennyvíziszap fermentlé utófermentációjának kísérleti eredményei

### 4.2.1. A szennyvíziszap fermentlé biogáz és metánhozam eredményei

a., *A biogáz hozam vizsgálata*

A délpesti szennyvíziszap szubsztrátum vizsgálatát három ismételt kísérlet sorozattal végeztem, minden esetben párhuzamos mintákkal. A párhuzamos eredmények átlagát vettem figyelembe az alábbi megállapítások során. A vizsgálathoz a délpesti szennyvíztelep rothasztó tornyából távozó, centrifuga előtti fermentlevet használtam (2,87–3,71% TS és 58,25–62,99% oTS). Az iszapot a kísérletsorozat indítását megelőzően, technikai okok miatt (szállítási, szárazanyag és szerves szárazanya-tartalom mérés stb.) 36 órán keresztül szobahőmérsékleten, keverés és etetés nélkül tároltam. Ezt követően a 9 napig tartó szakaszos fermentációt a 3.3 fejezet, a szárazanyag és a szerves szárazanyag-tartalom mérést 3.6 fejezet, a gázösszetétel meghatározását a 3.4 fejezet alapján végeztem.

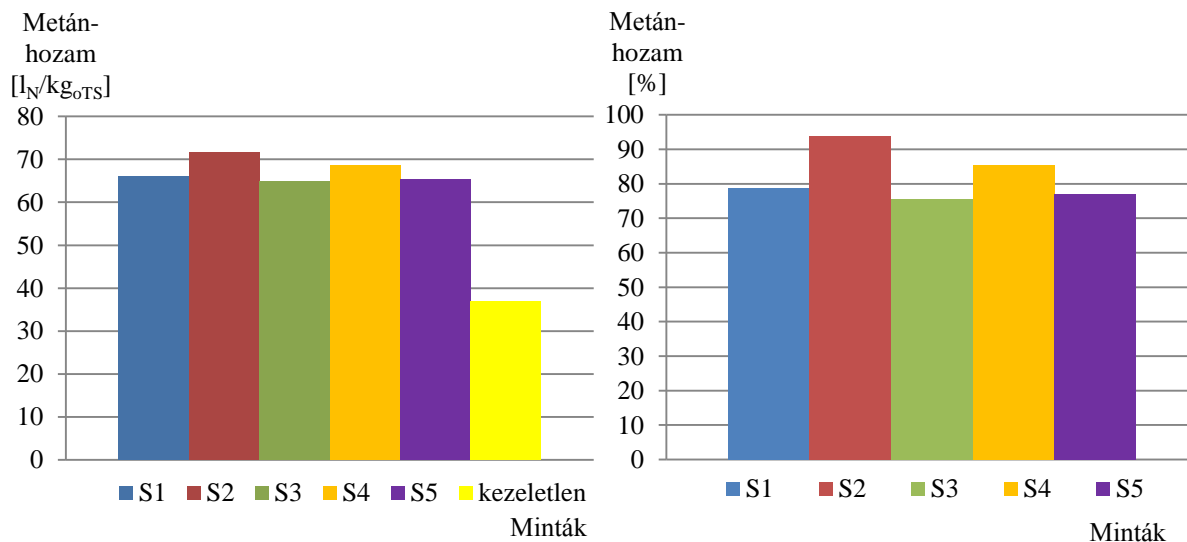


58. ábra A szennyvíziszap fermentlé minták egyes biogáz hozam értékei és a kezeletlen minta biogáz hozam értékeihez mért %-os eltérései

Megállapítható, hogy a kezelt szubsztrátumok fermentációja során a biogáz hozam 127,1–157,4  $l_N/kg_{OTS}$  közé esett. A kezeletlen fermentlé átlagos biogáz hozama 127,1  $l_N/kg_{OTS}$ . Az S1-S5 minták minden esetben többletgázt eredményeztek. Jelentős, 16,8–23,9% gázhozam növekedést mutattak a kezeletlen minta biogáz hozamához képest (58. ábra). A centrumpont a legalacsonyabb 16,8%-os gázhozam eltérést produkálta. A nagy fordulatszámnál végzett nagy recirkuláció S1 (2500 fordulat/min; 9 recirkuláció) jelölt minta mutatta a legmagasabb kezeletlen mintához képest a biogáz hozam eltérés értéket.

#### b., A metánhozam vizsgálata

A mérési eredmények alapján megállapítottam, hogy a kezelt minták metánhozama 37,0–71,6  $l_{NCH_4}/kg_{OTS}$  közé esett (59. ábra). A kezeletlen minta átlagos metánhozama 37  $l_{NCH_4}/kg_{OTS}$  értéket vett fel a 9. nap végére.

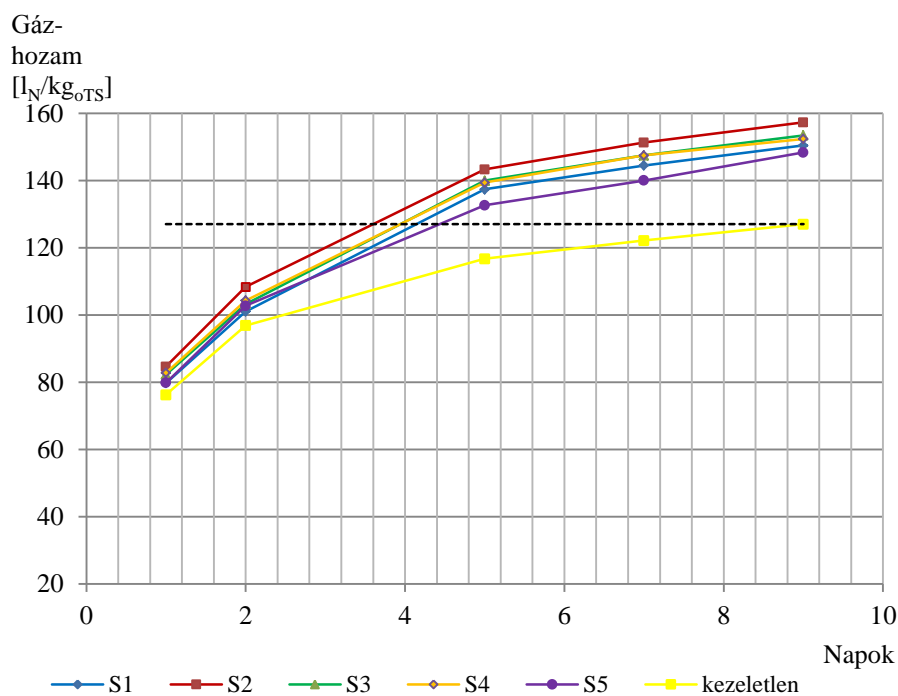


59. ábra A szennyvíziszap fermentlé minták egyes metánhozam értékei és a kezeletlen minta metánhozam értékeihez mért %-os eltérései

A kezelt minták minden esetben többlet metánt eredményeztek a kezeletlen szubsztrátum metánhozamához képest. Az eltérések %-os értékei 75,7–93,9% érték közé estek. A legkedvezőbb 93,9% metánhozam növekedést az S2 (2500fordulat/min; 9 recirkuláció) minta hozott.

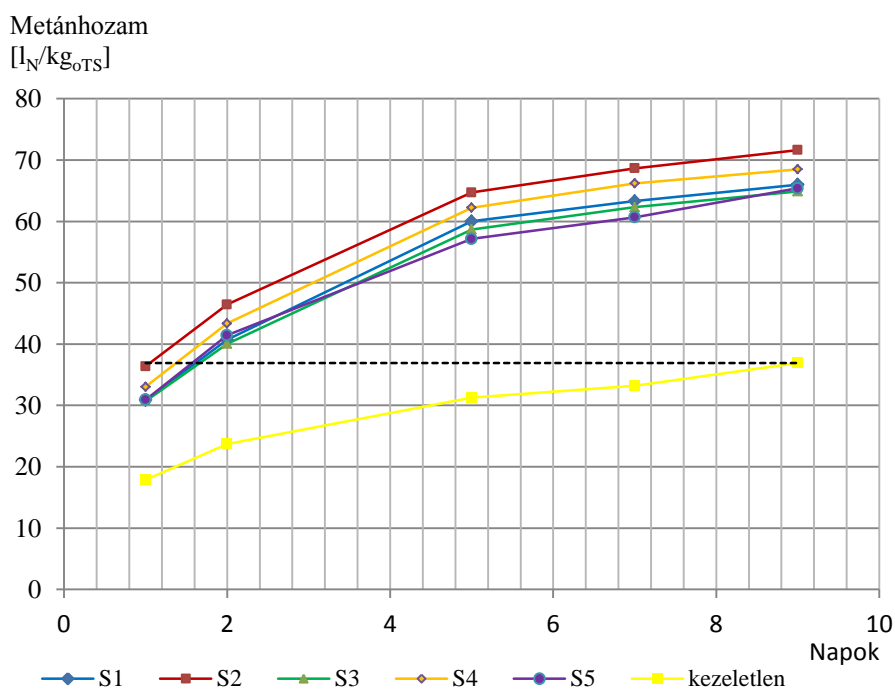
#### 4.2.2. Degradáció időbeli lezajlása

A kezeletlen minta a fermentáció 9. napján  $127,1 l_N/kg_{OTS}$  biogáz hozam átlagértéket, valamint a  $37 l_N/kg_{OTS}$  metánhozam átlagértéket ért el. A kezelt minták minden esetben ennél az értéknél nagyobb hozamokat mutattak. Megvizsgáltam, hogy a kezeletlen minta által elért biogáz hozam értéket, a kezelt minták a fermentáció során mikor érik el.



60. ábra A szennyvíziszap fermentlé biogáz hozamának időbeli kiértékelése

Minden esetben a 3. és 5. nap közé esik a  $127,1 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTS}}$  mennyiség elérése (60. ábra). Az egyes kezeléseknak alávetett minták lebomlásának időbeli sorrendje megegyezik a biogáz hozamok mennyiségének sorrendjével. Minden esetben leggyorsabban az S2 (2500 fordulat/min; 9recirkuláció) lépi túl a kezeletlen minta fermentációja alatt elért biogáz hozam értékét. Minden esetben az S5 centrum pont hozta legkésőbb a jelölt értéket.



61. ábra A szennyvíziszap fermentlé metánhozamának időbeli kiértékelése

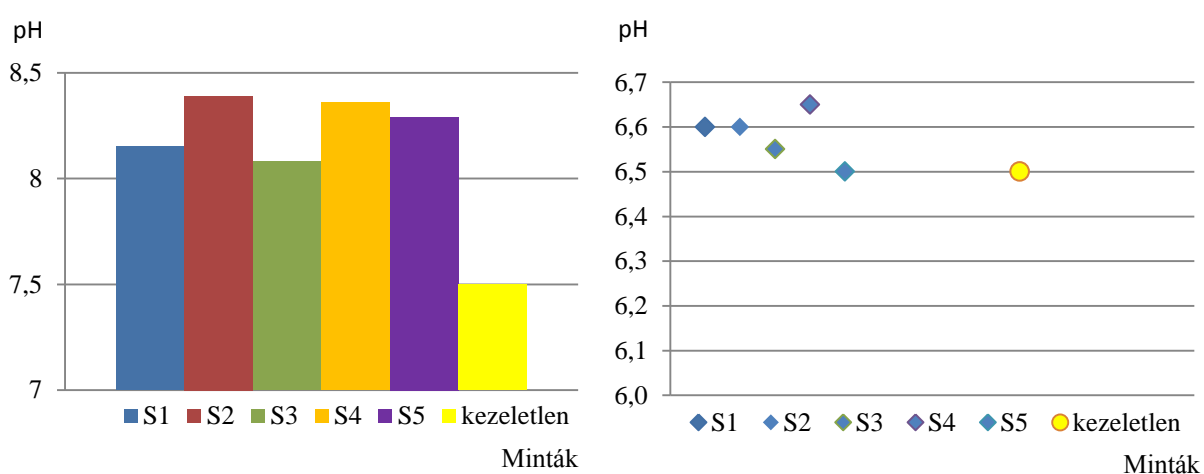


A kezeletlen szennyvíziszap fermentlé az anaerob degradáció végére  $37 \text{ l}_{\text{NCH}_4}/\text{kg}_{\text{OTS}}$  metán értéket ért el. Ennek elérése minden kezelt minta esetében megtörtént a 1. és 2. nap között. A 61. ábrán feltüntetett diagramon is látható, hogy a leghamarabb az S2 (2500 fordulat/min; 9recirkuláció) minta teljesítette ezt a hozamot.

#### 4.2.3. Az eredmények igazolása

##### a., A szennyvíziszap fermentlé pH érték mérése

A vizsgálat során megmértem az egyes kezeléseknek kitett iszap pH értékét a kísérletindítás elején (közvetlenül az előkezelés után), majd a 9 napos fermentáció végén.



62. ábra A szennyvíziszap fermentlevek rothasztás előtti és utáni pH értékei

A kezelt minták  $\text{pH} = 8,39 - 8,08$  érték között, a kezeletlen minta  $\text{pH} = 7,5$  értéket vett fel (62. ábra bal oldali kép). A kiejert fermentlevek pH változása a fermentáció végén jóval nagyobb a kezelt, mint a kezeletlen minta esetén.

##### b., A szennyvíziszap fermentlé szárazanyag és szerves szárazanyag értéke

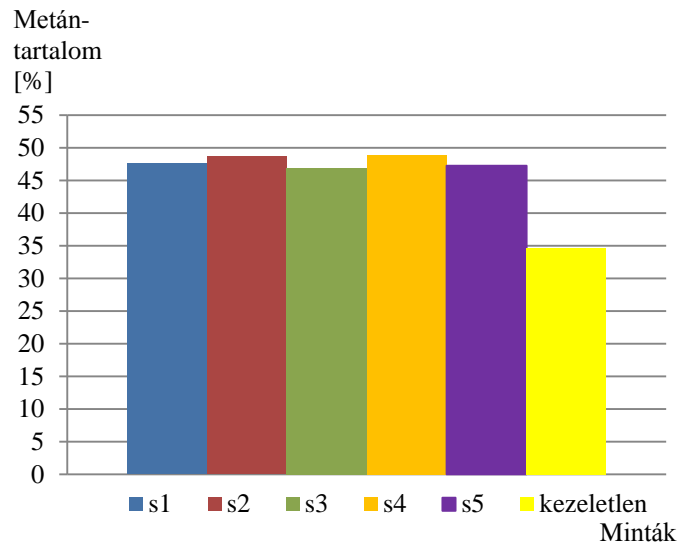
A rothasztási folyamat végén megmértem az egyes fermentlevek szárazanyag- és szerves szárazanyag-tartalmát. Minden esetben a kezeletlen minta szárazanyag- és szerves szárazanyag-tartalma mutatkozott magasabb értékűnek.

A visszamaradó fermentlé vizsgálata igazolja, hogy a berendezéssel kezelt minták jobb degradációs lebomlást eredményeztek. Ez a különbség főleg a szerves szárazanyag-tartalom esetében igaz.

##### c., A szennyvíziszap fermentlé átlag metánkoncentrációja az utófermentáció során

A 9 napos vizsgálat alatt 5 alkalommal vettem biogáz mintát a reaktorok belsejéből, melyek minőségi vizsgálatát a kromatográf segítségével határoztam meg. A százaléktételeket megszoroztam az egyes mérések között eltelt napok számával és összegeztem őket, végül elosztottam a teljes degradációs

idővel. Így kaptam meg az egyes reaktorokban termelődött metán átlagok %-os értékét a vizsgálat teljes idejére nézve. A továbbiakban a párhuzamos mérések átlagát elemzem.



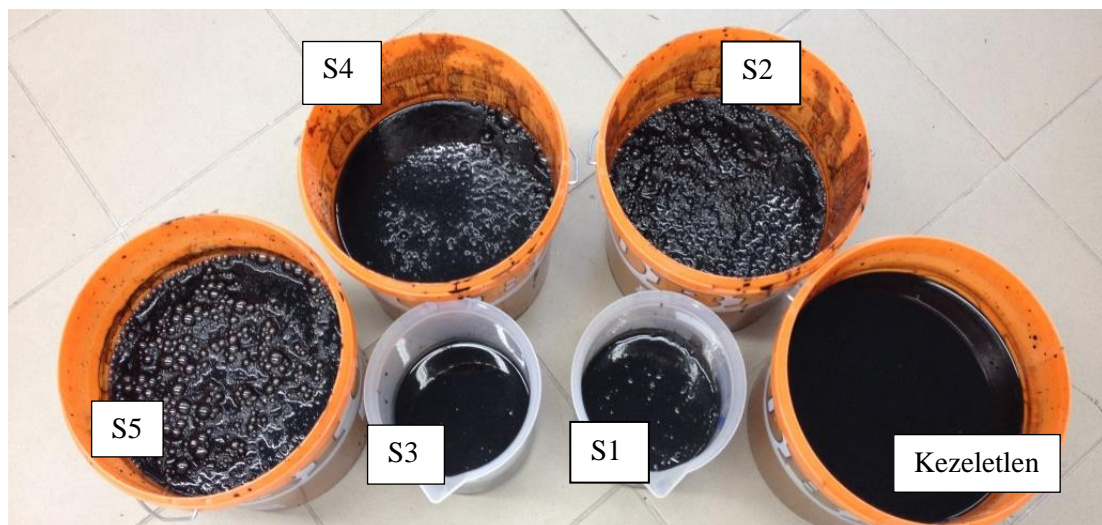
63. ábra A szennyvíziszap fermentlé utófermentációja során termelt biogáz %-os metán értéke

A kezeletlen minta átlag metán értéke a fermentáció alatt 34,8%. Jelentősebb koncentrációnövekedést (47–49%) a nagyobb recirkulációval kezelt minták mutattak (63. ábra).

*d., A szennyvíziszap fermentlé kezelt mintáinak szemrevételezése*

A Shark berendezéssel történő kezelést követően az egyes minták szemmel láthatóan fizikailag is megváltoztak.

A kezeletlen fermentlé felszíne sima, míg a kezelt fermentlé mindegyike a 64. ábrán látható módon nagymértékben felhabosodott.



64. ábra Szennyvíziszap fermentlé kezelésének szemmel látható eredménye (Forrás: saját kép)

A fenti ábra jobb alsó sarkában elhelyezett kezeletlen minta sima felszíne eltér a mellette látható S1, S2, S3, S4, S5 minták felszínétől.

#### 4.2.4. Energiamérleg

Elvégeztem az energiamérleg vizsgálatát a délpesti szennyvíz fermentlé szubsztrátum esetében is. A 4.1.4 fejezetben ismertetett lépések alapján haladtam. A szubsztrátum szárazanyagtartalmát és szerves szárazanyag-tartalmát minden esetben méréssel határoztam meg, melyeket a számításaim során az így kapott értékekkel vettem figyelembe.

A számításaim során eredményül azt kaptam, hogy a nagy recirkulációs számmal (9db) végzett kezelés esetében a befektetett energia nagyobb, mint a kezeléssel nyert energia (16. táblázat). Azaz az S2 és S4 minták energianyeresége negatív. Az S1, S3, S5 minták energiamérlege pozitív.

A legkevesebb energia veszteséget az S3 (1600 fordulat/min; 3 recirkuláció) paraméterekkel kezelt iszap mutatta.

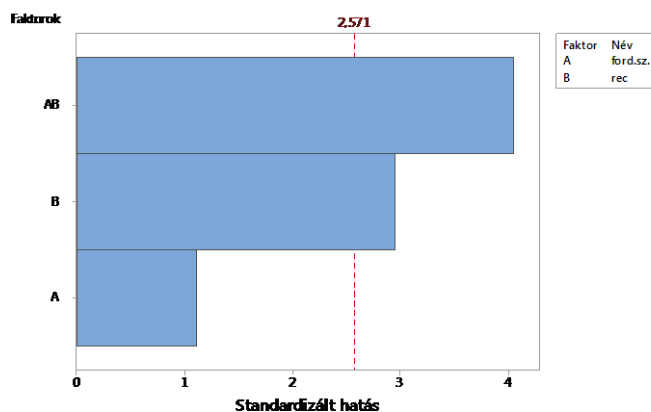
16. táblázat Délpesti szennyvíziszap fermentlé utófermentációs mintáinak energiamérlege

Minták száma	S1	S2	S3	S4	S5	kezeletlen
A minták átlag metánhozama $\text{ml}_\text{N}/\text{kg}_{\text{OTS}}$	67,00	72,45	64,00	67,60	64,80	37,51
A minták átlag metánhozama $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{OTS}}$	0,067	0,072	0,064	0,068	0,065	0,038
A termelődött metán energia értéke (MJ/kg <sub>OTS</sub> )	2,40	2,59	2,29	2,42	2,32	1,34
Kezelt és kezeletlen minta termelődött metán energia különbsége [MJ/kg <sub>OTS</sub> ]	1,04	1,24	1,00	1,13	1,02	0,00
Az aprítás ideje (s/kg <sub>OTS</sub> )	66,84	66,84	66,84	66,84	66,84	
Az aprítás ideje (h/kg <sub>OTS</sub> )	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
Adott fordulatszámon felvett teljesítmény (kW)	2,80	2,80	2,04	2,04	2,40	
Recirkuláció száma	3,00	9,00	3,00	9,00	6,00	
1kg <sub>OTS</sub> fermentlé aprításának energiaigénye adott fordulatszámon és recirkulációval [kWh/kg <sub>OTS</sub> ]	0,16	0,47	0,11	0,34	0,27	
Aprítási energia (MJ/kg <sub>OTS</sub> )	0,56	1,68	0,41	1,23	0,96	
Energia nyereség (MJ/kg <sub>OTS</sub> )	0,48	-0,44	0,59	-0,10	0,06	
Bevitt és kapott energia aránya %	0,85		1,45		0,06	

#### 4.2.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálata szennyvíztelepi fermentlé szubsztrátum esetén

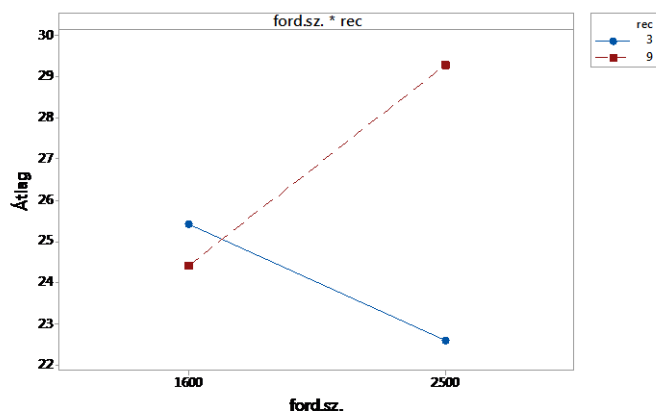
Megvizsgáltam az anaerob fermentáció végén (9. napon) a kezeletlen mintához képest kapott biogáz és metántöbbletet. Ezen különbségek értékeit az ANOVA módszerrel értékeltem ki. A MINITAB program által kapott biogáz hozamtöbblet és a metánhozam többlet hatásdiagramja látható az alábbi Pareto diagramon.

A 65. ábrán látható, hogy a biogáz hozam esetén 95 %-os szignifikancia szinten hatást mutat az eredményekre a fordulatszám és a recirkuláció kölcsönhatása, továbbá a recirkuláció. Megállapítható, hogy a kísérleti beállítások által meghatározott térben a nagyobb recirkuláció eredményez nagyobb gázhozamot.



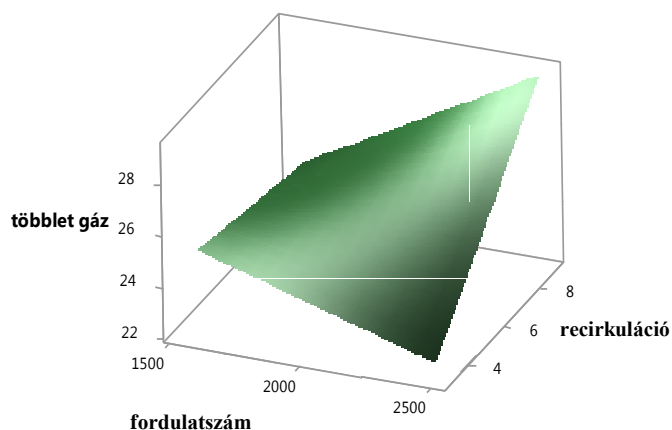
65. ábra Folyadéknyírás és ütközés elvén történő kezelés biogáz hozamának vizsgált faktorai a szennyvíziszap fermentlé esetében

A fordulatszám-recirkuláció kölcsönhatásának vizsgálata során megállapítható, hogy alacsony fordulatszám esetében a recirkulációk száma elhanyagolható befolyással van a gázhozamra (66. ábra). Magasabb fordulatszám értéken vizsgálva, a nagy recirkuláció beállítások mellett adódik a nagy értékű biogáz hozam többlet (67. ábra).



66. ábra A fordulatszám és a recirkuláció kölcsönhatása szennyvíziszap fermentlé eseténben

A gázhozam többlet 1,346 I<sub>N</sub>/kg<sub>oTS</sub> értékű szórását, az R<sup>2</sup> determinációs együttható 90,79%-os értéket mutatott.



67. ábra Többletgáz ábrázolása a fordulatszám és a recirkuláció függvényében a szennyvíziszap fermentlé vizsgálata során

A regressziós egyenletben szereplő biogáz és metánhozam többletet befolyásoló faktorok együtthatóit a MINITAB szoftver segítségével határoztam meg.

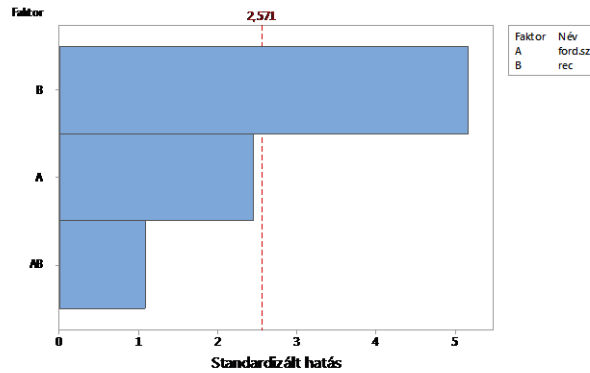
A folyadéknyíró és ütközéses elven működő berendezéssel kezelt szennyvíztelepi fermentlé szubsztrátum anaerob rothasztása során termelt biogáz többlet várható értékének becsült regressziós függvénye:

$$9nap\_g\ddot{a}zt\ddot{o}bblet = 37,8 - 0,00740n - 2,46R + 0,001428n \cdot R \quad (7)$$

ahol  $n$  – a fordulatszám értéke,

$R$  – a recirkuláció száma,

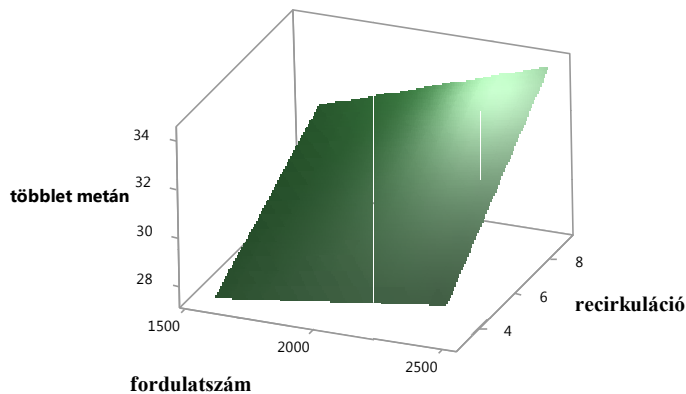
$n \cdot R$  – a fordulatszám-recirkuláció együttes hatása.



68. ábra Folyadéknírási és ütközési elven történő kezelés metánhozamának vizsgált faktorai a szennyvíztelepi fermentlé esetében

A metánhozam esetén a recirkuláció van hatással a többlethozam értékekre (68. ábra). Az aprítás ismétlési számának növelésével nő a metánhozam is. A fordulatszám megközelíti a 95%-os szignifikancia határt.

A metánhozam többlet  $1,25 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$  értékű szórást, az  $R^2$  determinációs együttható 88%-os értéket mutatott.



69. ábra A szennyvíziszap fermentlé vizsgálata során kapott többllet metán ábrázolása a fordulatszám és a recirkuláció függvényében

A 69. ábrán látható a metántöbbllet egyenletének háromdimenziós ábrázolása. Az optimum, vagyis a legmagasabb elérhető többlletmetán, itt is a magas fordulatszám – nagy recirkulációs értékénél látható. A linearitás megfelelő, a sík világos (görbületi) része a megfelelési határértéken belül marad. A fordulatszám-recirkuláció kölcsönhatása elhanyagolható.

A folyadékníró és ütközési elven működő berendezéssel kezelt délpesti fermentlé szubsztrátum anaerob rothasztása során termelt metántöbbllet várható értékének becsült regressziós függvénye:

$$9_{\text{nap\_metántöbbllet}} = 25,26 + 0,0027n + 0,032R + +0,000355n \cdot R \quad (8)$$

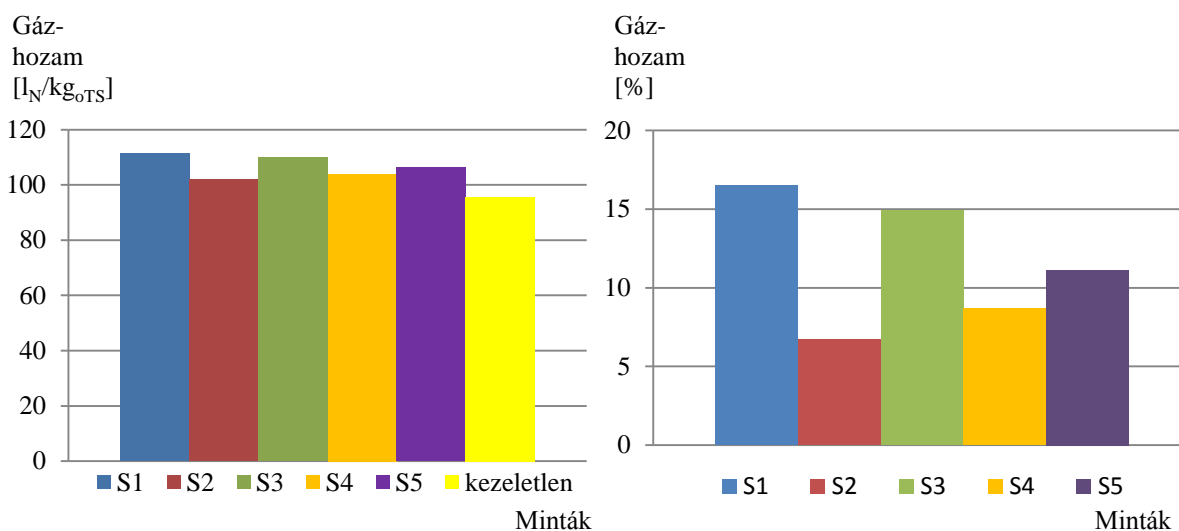
ahol  $n$  – fordulatszám értéke,  
 $R$  – recirkuláció száma,  
 $n \cdot R$  – fordulatszám-recirkuláció együttes hatása.

### 4.3. Mezőgazdasági alapú fermentlé utófermentációjának kísérleti eredményei

#### 4.3.1. A mezőgazdasági fermentlé biogáz és metánhozam eredményei

##### a., A biogáz hozam vizsgálata

A mezőgazdasági fermentlé vizsgálatát három ismételt kísérlet sorozattal végeztem, minden esetben párhuzamos mintákkal. A párhuzamos eredmények átlaga alapján végeztem a kísérletsorozat kiértékelését. A vizsgálathoz 3,16–3,71% szárazanyag tartalmú és 61,49–64,32% szerves szárazanyag-tartalmú fermentlevet használtam. Az oltóiszap a kísérletsorozat indítása előtt 36 órát állt szobahőmérsékleten, keverés és etetés nélkül. A 8 napig tartó szakaszos fermentációt a 3.3 fejezet, a szárazanyag és a szerves szárazanyag-tartalom mérését 3.6 fejezet, a gázösszetétel meghatározását a 3.4 fejezet alapján végeztem.

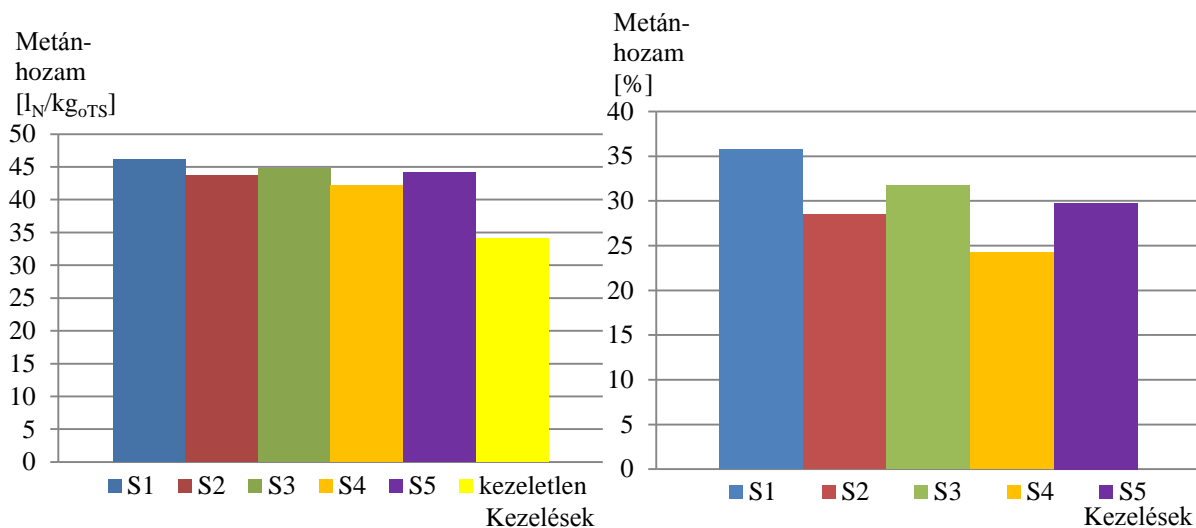


70. ábra A mezőgazdasági fermentlé minták egyes biogáz hozam értékei és a kezeletlen minta biogáz hozam értékeihez mért %-os eltérései

Megállapítható, hogy a kezelt minták biogáz hozama 102–111,4  $l_N/kg_{OTS}$  közé esett. A kezeletlen iszap átlagos biogáz hozama 95,6  $l_N/kg_{OTS}$ . A kezelt iszap minden esetben többlet gázt eredményezett. A minták 6,7–16,5% közötti gázhozam növekedést mutattak a kezeletlen iszap biogáz hozamához képest. Az S1 (2500 ford/min; 3rec) minta mutatta a legmagasabb kezeletlen mintához vett hozam eltérés értéket (70. ábra).

### b., A metánhozam vizsgálata

A mérések eredményéből megállapítható, hogy a kezelt szubsztrátumok metánhozama 42,2–46,1 l<sub>N</sub>/kg<sub>oTS</sub> közé esett. A kezeletlen minta átlagos metánhozama 34,0 l<sub>N</sub>/kg<sub>oTS</sub> értéket vett fel a 8. nap végére (71. ábra).



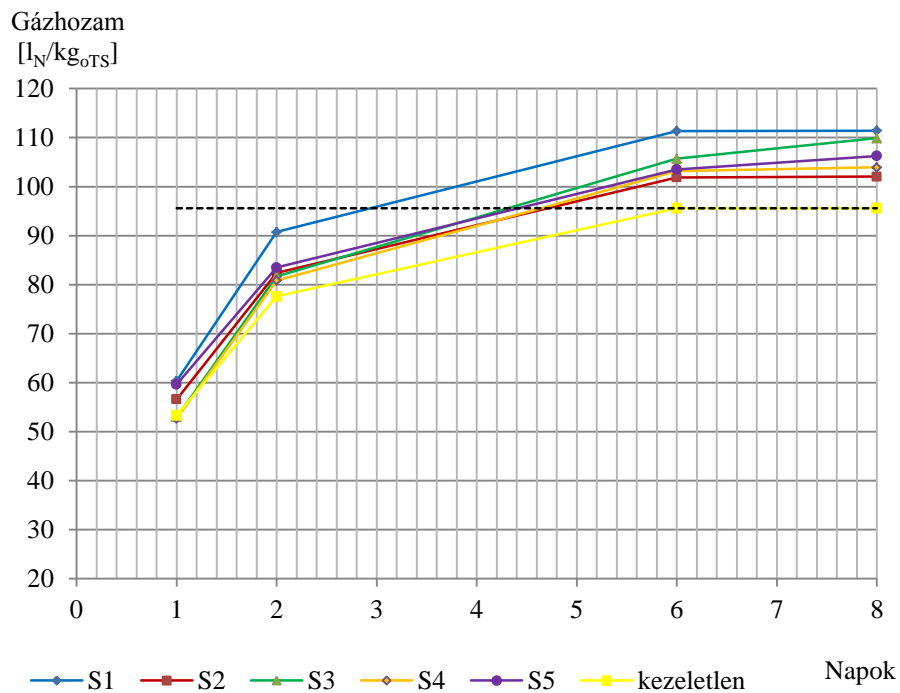
71. ábra A mezőgazdasági fermentlé kezelések hatására elért metánhozam értékei és a kezeletlen minta metánhozam értékeihez mért %-os eltérései

A kezelt iszap minden esetben többlet metánt eredményezett. Az S1 (2500 fordulat/ min; 3recirkuláció) hozama mutatta a legnagyobb kezeletlen mintához viszonyított metánhozam 35,7%-os eltérést. A legalacsonyabb eltérés az S4 (1600 fordulat/min; 9 recirkuláció) minta esetében 24,2%.

#### 4.3.2. Degradáció időbeli lezajlása

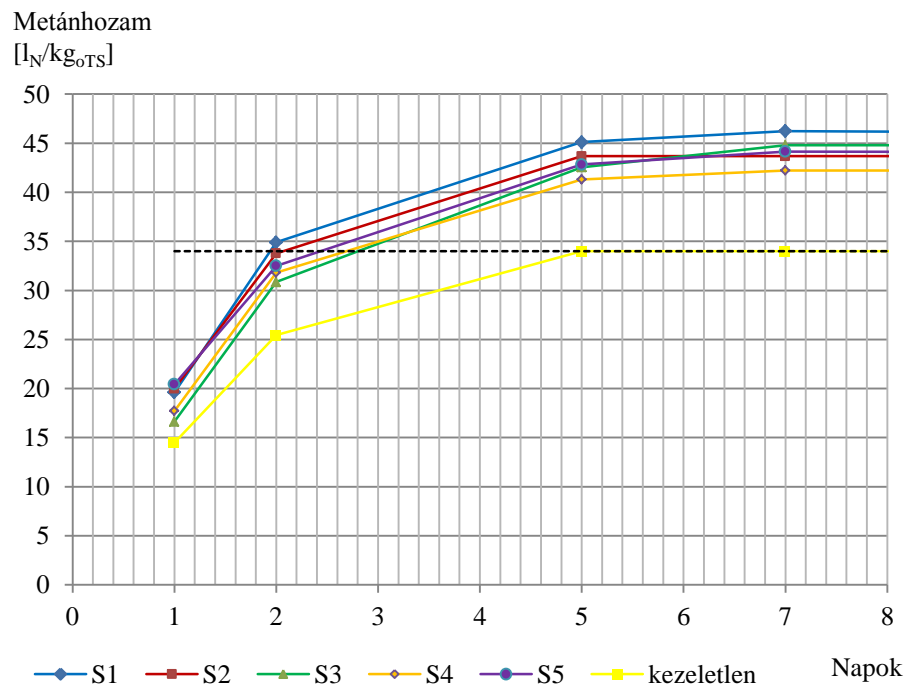
A kezeletlen minta az anaerob fermentáció 8. napján elérte a 95,6 l<sub>N</sub>/kg<sub>oTS</sub> biogáz, valamint a 34 l<sub>N</sub>/kg<sub>oTS</sub> metánhozam értéket. A kezelt minták minden esetben ennél az értéknél nagyobb hozamokat értek el. Megvizsgáltam, hogy a kezeletlen minta által elért biogáz hozam értéket a kezelt minták a fermentációjuk során mikor érik el.





72. ábra A mezőgazdasági fermentlé biogáz hozamának időbeli kiértékelése

Minden esetben 3–5 nap közé esik a  $95,6 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$  biogáz mennyiség elérése (72. ábra). A mérések során az egyes kezeléseknél alávetett minták degradációs gyorsasága egyezik meg a minták biogáz hozam mennyiségének sorrendjével. Minden esetben leggyorsabban az S1 (2500 fordulat/min; 3 recirkuláció) minta lépte túl a kezeletlen minta elért biogáz hozam értékét.



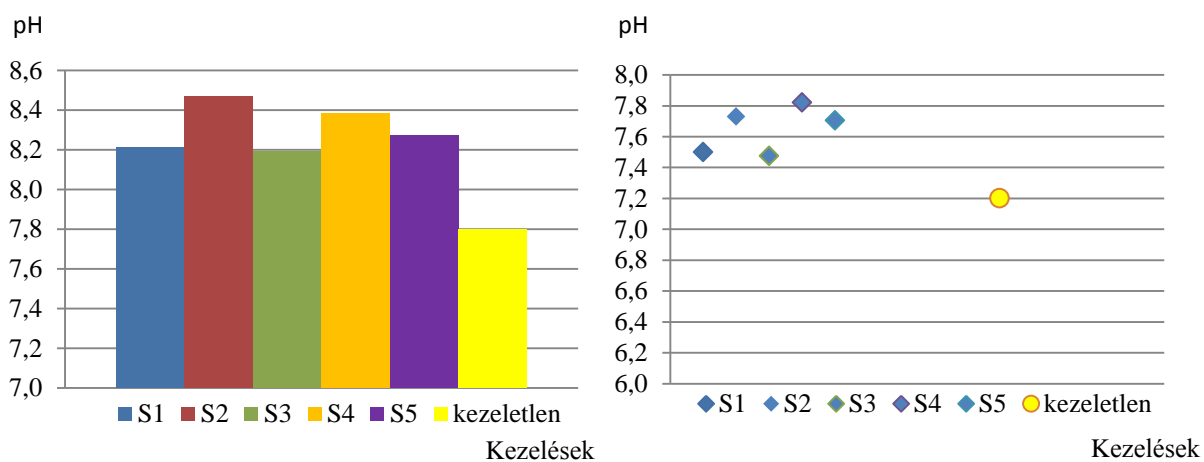
73. ábra A mezőgazdasági fermentlé metánhozamának időbeli kiértékelése

A kezeletlen minta metán értéke  $34 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{oTS}}$  értéket vett fel, melynek elérése minden kezelt minta esetében megtörtént a 2. és a 3. nap között (73. ábra). Ennél a vizsgálatnál is látható, hogy a leghamarabb az S1 (1600 fordulat/min; 3recirkuláció) minta teljesítette az értéket.

### 4.3.3. Az eredmények igazolása

#### a., pH érték

A vizsgálat során megmértem az egyes kezeléseknél kitett iszap pH értékét a kísérletindítás elején, majd a fermentáció végén.



74. ábra A mezőgazdasági fermentlevek rothasztás előtti és utáni pH értékei

Az egyes kezeléseknél kitett kezdeti fermentlé pH = 8,19–8,47. Ez jóval magasabb, mint a kezeletlen fermentlé által meghatározott 7,8 pH érték (74. ábra bal oldal). A lebomlott fermentlevek pH változása a fermentáció végére jóval nagyobb a kezelt, mint a kezeletlen minta esetén.

#### b., Fermentációs maradék TS és oTS érték meghatározása

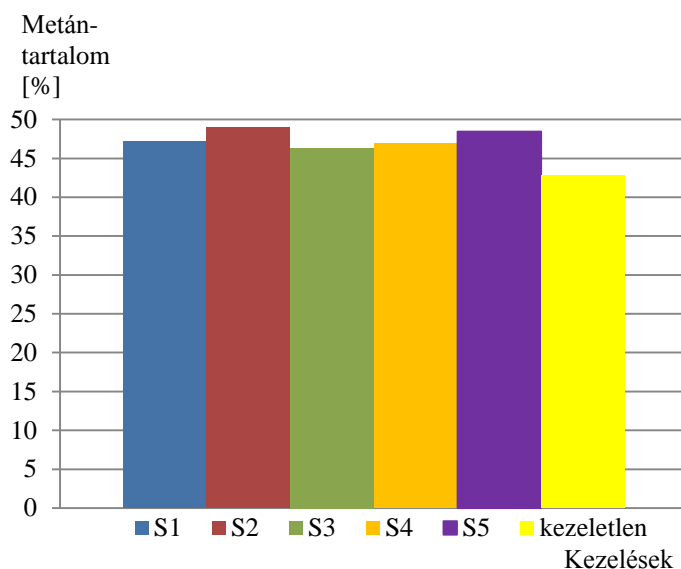
A rothasztási folyamat végén megmértem az egyes fermentlevek szárazanyag- és szerves szárazanyag-tartalmát. Minden esetben a kezeletlen minta szárazanyag és szerves szárazanyag-tartalma mutatkozott magasabb értékűnek.

A visszamaradó fermentlé vizsgálata igazolja, hogy a berendezéssel kezelt minták jobb degradációs lebomlást eredményeztek. Ez a különbség főleg a szerves szárazanyag-tartalom esetében igaz.

#### c., A mezőgazdasági fermentlé minták átlagos metánkoncentrációja az utófermentáció során

A mezőgazdasági fermentlé biogáz hozamainak minőségi vizsgálatát a 4.2.3 Az eredmények igazolása című fejezet c., részében leírtaknak megfelelően vizsgáltam meg. A 75. ábrából leolvasható, hogy

46,3–49,0% közötti értéket vesz fel a kezelt szubsztrátum minták által termelt biogáz átlagos metánkoncentráció értéke. A kezeletlen szubsztrátum átlagos metánkoncentrációja 42,8%.

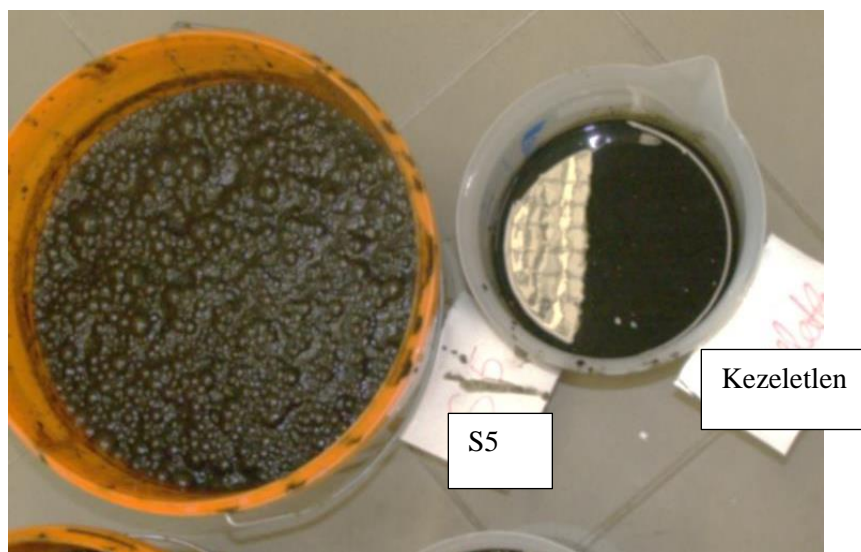


75. ábra A mezőgazdasági fermentlé utófermentációja során termelt biogáz %-os metán értéke

d., A kezelt minták szemrevételezése

A kezelést követően az egyes minták szemmel láthatóan fizikailag is megváltoztak.

A kezeletlen fermentlé felszíne sima, míg a kezelt fermentlévek mindegyike a 76. ábrán látható módon nagymértékben felhabosodott.



76. ábra A mezőgazdasági fermentlé kezelésének szemmel látható eredménye (Forrás:saját kép)

#### 4.3.4. Energiamérleg

Elvégeztem az energiamérleg vizsgálatát a mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum esetében is. A már 4.1.4 fejezetben ismertetett lépések alapján haladtam. A szubsztrátum szárazanyag-tartalmát és szerves szárazanyag-tartalmát ebben az esetben is méréssel határoztam meg, melyeket számításaim során ennek megfelelően vettem figyelembe.

Ebből adódik, hogy számításaim végén a kezelés során befektetett energia nagyobb értéket vett fel, mint a nyert energia.

Mivel minden szennyvíz-mezőgazdasági fermentáció üzemi hozamértékei jelentősen eltérnek egymástól az alapanyag minősége és az alkalmazott technológia miatt, így ennek megfelelően nem található a szakirodalomban megjelölt várható biogáz hozamérték.

A kimért értékek számításai alapján megállapíthatom, hogy az energiamérleg egyik esetben sem vett fel pozitív értéket. A legkevesebb energia veszteséget (0 körüli érték) itt is az S3 (1600 fordulatszám/min; 3recirkuláció) paraméterekkel kezelt, majd utófermentált fermentlé minta mutatta (17. táblázat).

17. táblázat Mezőgazdasági fermentlé utófermentációs mintáinak energiamérlege

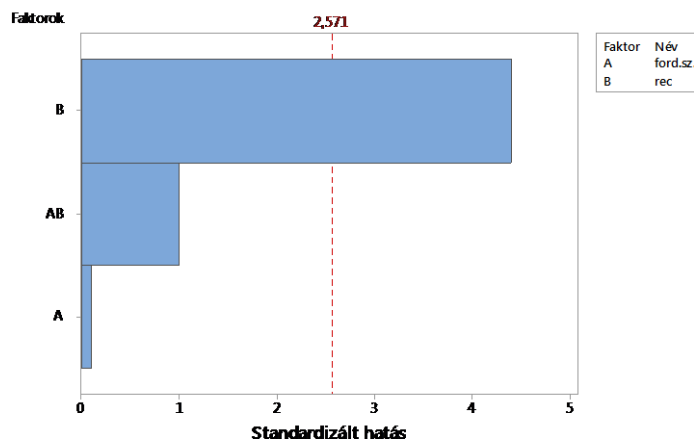
Szám	S1	S2	S3	S4	S5	kezeletlen
A minták átlag metánhozama $m^3/kg_{oTS}$	0,046	0,044	0,045	0,042	0,044	0,034
A termelődött metán energia értéke (MJ/kg <sub>oTS</sub> )	1,651	1,563	1,603	1,511	1,579	1,217
Kezelt és kezeletlen minta termelődött metán energia különbsége [MJ/kg <sub>oTS</sub> ]	0,435	0,346	0,386	0,295	0,362	0,000
1kg szárazanyag tartalmú szalma aprítása adott ford számon levő teljesítménye szorozva a recirkulációval (kWh/kg <sub>oTS</sub> )	0,146	0,438	0,106	0,319	0,250	
Aprítási energia (MJ/kg <sub>oTS</sub> )	0,525	1,575	0,383	1,148	0,900	
Energia nyereség (MJ/kg <sub>oTS</sub> )	-0,090	-1,229	0,004	-0,853	-0,538	

#### 4.3.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálata mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum esetén

Megvizsgáltam az anaerob fermentáció végén (8. napon) a kezeletlen mintához képest kapott biogáz- és metántöbbletet. Ezen különbségek értékeit az ANOVA módszerrel értékeltem ki. A MINITAB program által kapott biogáz hozamtöbblet hatásdiagramja látható az alábbi Pareto diagramon (77. ábra).

Látható, hogy a biogáz hozam esetén 95%-os szignifikancia szinten a recirkuláció mutat hatást. Megállapítható, hogy a kísérleti térben meghatározott értékek között a recirkuláció és a biogáz hozam

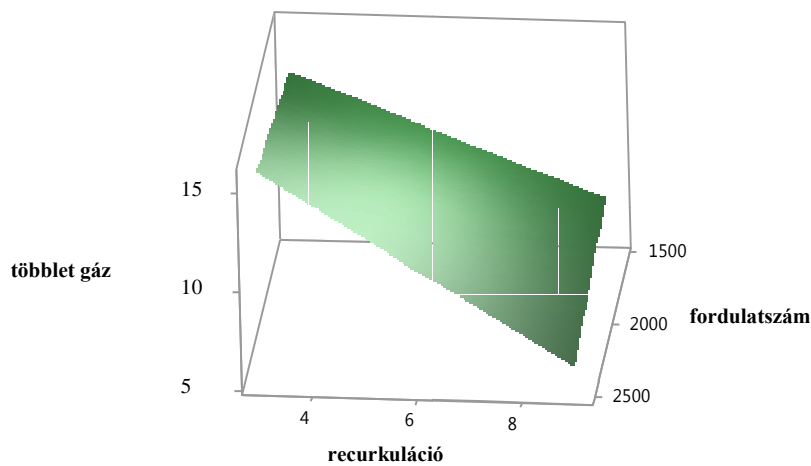
között fordított arányosság van: kisebb recirkuláció eredményez magas gázhozamot. Kereszthatás nincs a recirkuláció és a fordulatszám között.



77. ábra Folyadéknyírás és ütközés elven történő kezelés biogáz hozamának vizsgált faktorai mezőgazdasági fermentlé esetében

A gázhozam többlet 2,261 l<sub>N</sub>/kg<sub>oTS</sub> értékű szórását, az R<sup>2</sup> determinációs együttható 80,10%-os értéket mutatott.

A kísérleti térben a maximális gázhozam elérését a nagy fordulatszámon működő berendezés 3 recirkulációs kezelése adja, amit a háromdimenziós ábra is mutat (78. ábra).



78. ábra Többletgáz ábrázolása a fordulatszám és a recirkuláció függvényében mezőgazdasági fermentlé esetében

A folyadéknyíró és ütközéses elven működő berendezéssel kezelt mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum anaerob rothasztása során termelt biogáz többlet várható értékének becsült regressziós függvénye:

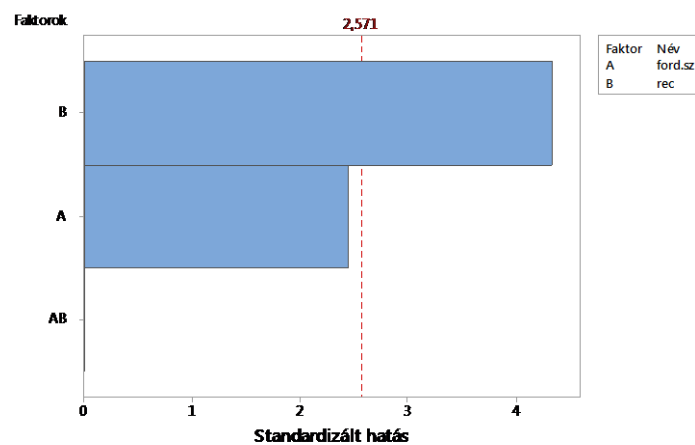
$$\delta_{nap\_g\acute{a}zt\ddot{o}bblet} = 11,27 + 0,00365n + 0,03R - 0,000640n \cdot R \quad (9)$$

ahol  $n$  – a fordulatszám értéke,

$R$  – a recirkuláció száma,

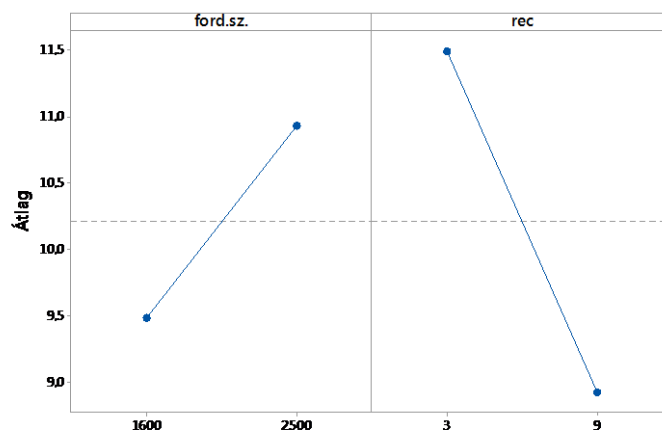
$n \cdot R$  – a fordulatszám-recirkuláció együttes hatása.

A kapott metánhozam többlet hatáselemzése található a 79. ábrán feltüntetett Pareto diagramon. Látható, hogy a 95%-os szignifikancia határt, ebben az esetben is csak a recirkuláció lépte át. Megállapítható, hogy a kísérleti térben meghatározott értékek között a recirkuláció és a metánhozam között, itt is fordított arányosság van: a kisebb recirkuláció eredményez nagyobb metánhozamot.



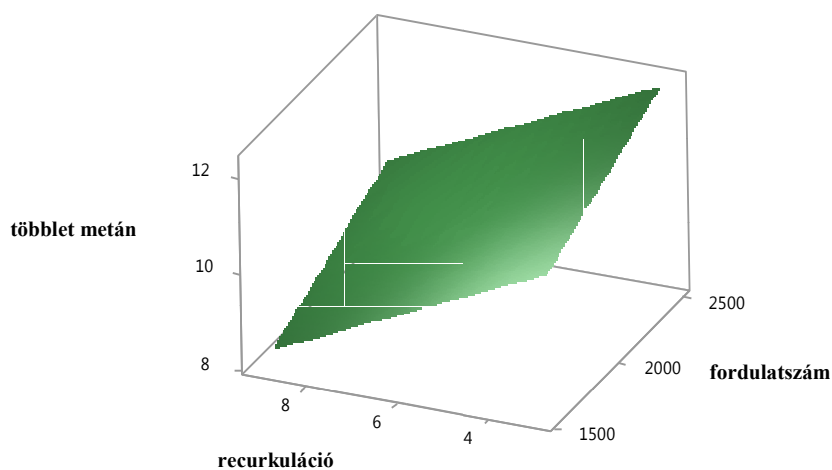
79. ábra Folyadéknyírás és ütközés elven történő kezelés metánhozamának vizsgált faktorai mezőgazdasági fermentlé esetében

A fordulatszám megközelíti a szignifikancia-határt. Egyenes arányban van a metánhozam a fordulatszám értékével. Nagy fordulatszám nagy metánhozamot, kis fordulatszám alacsonyabb metánhozamot eredményez (80. ábra).



80. ábra Fordulatszám és recirkuláció hatásábrája mezőgazdasági fermentlé esetében

A metánhozam többlet  $1,766 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$  értékű szórást, az  $R^2$  determinációs együttható  $83,16\%$ -os értéket mutatott. A kísérleti térben a maximális metánhozam elérését a nagy fordulatszámon működő berendezés 3 recirkulációs kezelése adja, amit a háromdimenziós ábra is mutat (81. ábra).



81. ábra Többlet metán ábrázolása a fordulatszám és a recirkuláció függvényében a mezőgazdasági fermentlé esetében

A folyadéknyíró és ütközéses elven működő berendezéssel kezelt mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum anaerob rothasztása során termelt metántöbblet várható értékének becsült regressziós függvénye:

$$8n_{\text{ap\_metántöbblet}} = 9,47 + 0,00162n - 0,426R - 0,000001n \cdot R \quad (10)$$

ahol  $n$  – fordulatszám értéke,

$R$  – recirkuláció száma,

$n \cdot R$  – fordulatszám-recirkuláció együttes hatása.

## 5. Az eredmények összefoglalása, elemzése

### 5.1. Búzaszalma szubsztrátum fermentációjának összegzése

#### 5.1.1. Biogáz és metánhozam

A kezeletlen mintához képest, a kezelt minta gázhozam (4–50%) és a metánhozam (4–70%) százalékos eltéréseiből látható, hogy a kezelés nem csak a biogáz termelékenységet növelte, hanem a gáz minőségét (metántartalom növekedését) is jelentősen javította. Mindkét hozam esetében jelentősebb eltérést mutatott a nagyobb áztatási idő után kezelt minta. Ennek oka, hogy a Shark berendezéssel történő felületújítási mechanizmus, a nedvesedési hajlammal együtt járó pórusnövekedést eredményez, ami a baktériumok tápanyaghoz történő hozzáférését jelentősen javítja. Az 1,25% szárazanyag-tartalmú alapanyag, 15 órás áztatását követően, 1600 1/min fordulatszámon, 9 recirkulációval kezelt búzaszalma termelt gáz és metánhozam mennyiségek mutatkoztak a legjobbnak.

#### 5.1.2. A degradáció időbeli lezajlása

A kezeletlen minták 16 napos fermentációja alatt kapott gáz és metán értékeket a kezelt minták hozamai néhány nap alatt elérték. Látható, hogy az alapanyag áztatási idejének növelésével a napok száma tovább csökken. A nagyobb áztatási idő után kezelt szubsztrátumok (S5, S6, S7, S8) a biogáz hozam értéket 6–8 nap, a metánhozam értéket 5–8 nap alatt elérték.

A degradációs sebesség nagyobb az S3, S6, S7, S8, S9 esetekben, ahol a kezeletlen minta teljes degradációs ideje (16 nap) alatt elért hozam értékeit a kezelt minták egyharmad idő alatt elérték. Több esetben a metánhozam érték előbb elérte a kezeletlen minta degradációja során kapott értéket, mint a biogáz hozam vizsgálata esetében. Ez nem csak a több, hanem a jobb minőségű gáznak köszönhető (5.1.1). Rövid áztatási időt alkalmazó alapanyag kezelés során az S3 minta (1600 fordulat /min; 9 recirkuláció; 1 óra; 2,5%TS), a nagy áztatási időt alkalmazó alapanyag kezelés során pedig az S7 minta (1600 fordulat /min; 9 recirkuláció; 15óra; 1,25%TS), és az S8 minta (2900 fordulat /min; 9 recirkuláció; 15 óra; 2,5%TS) érte el leghamarabb a kezeletlen szubsztrátum által termelt értékeket. A statisztikai elemzés alapján a szárazanyag-tartalom és a fordulatszám indifferens a 9. napig, a többlet hozamok tekintetében.

Az S3, S7, S8 eredmények értelmében az időbeli gyorsaságot az áztatási idő nem befolyásolja, csak a recirkulációk száma.



### *5.1.3. A fermentációs rothasztási eredményt igazoló vizsgálatok*

A nedvesedési hajlamot növelte az előkezelés, mert fajlagos felületnövelő hatása lehetővé tette, hogy a vízmolekulák könnyebben a rostok közé jussanak. A kezelt minták vizes szuszpenzióban maradó szerves elemeinek aránya hasonló a biogáz és a metánhozam eltérések arányában.

A mért KOI értékek szintén alátámasztják a biogáz és a metánhozam egyes kezelésekkal elért eredményeit. A vizsgálat során kiemelkedően magas értéket az S3 minta (1600 fordulat/min; 9 recirkuláció; 1 óra; 2,5% TS) és S7 minta (1600 fordulat/min; 9 recirkuláció; 15 óra; 1,25% TS) érte el. A mechanikus kezelés hatására történő fajlagos felületnövelés a búzaszalma hatékonyabb vízbe oldódását eredményezte.

### *5.1.4. Energiamérleg*

Az összetartozó bevitt és a kapott energia arányaként, a legjobb értéket az S5 (1600 fordulat/min; 3recirkuláció; 15 óra; 2,5% TS) paraméterrel rendelkező beállítás hozta. Ez az optimum azonban nem esik egybe a biogáz és a metánhozamok alapján kapott mennyiség értékkel, ahol az S7 minta (1600 fordulat/min; 9 recirkuláció; 15 óra; 1,25% TS) mért mennyiségei mutatkoztak a legjobbnak.

### *5.1.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálati összegzése búzaszalma fermentációja szempontjából*

A biogáz és a metánhozam növelésére legnagyobb hatással a recirkuláció száma volt. A kezelési idő növelésével arányosan nőtt a rothasztási hatékonyság. Ennek oka, hogy a többszöri roncsolás eredményesebb fajlagos felületnöveléssel jár.

Szintén szignifikáns hatásként jelentkezett az alapanyag áztatási idejének hatása, amelynél az áztatási idő növelésével a kihozatal nőtt. A hozamok tekintetében ennek hatása kisebb mértékű, mint a recirkulációé. A szubsztrátum tömege növekedett, az ütközés során ért roncsolási hatékonysággal együtt.

A fordulatszám – recirkuláció együttes hatása, csak a degradáció végén mért metántartalomra hat befolyásoló tényezőként.

A gáztöbblet és a metántöbblet értékelésekor a keresztthatások ábrái mindkét esetben hasonló tendenciát mutattak. Ennek oka, hogy a kezelés hasonló befolyásoló tényezőkkel bír a biogáz és a metánhozam esetében.

A kis recirkuláció – nagy fordulatszám, és nagy recirkuláció – kis fordulatszám eredményez magas gázhozamot. Ennek oka, hogy nagy fordulatszám esetén nagy az aprító dob kerületi sebessége, ami nagy sebességre gyorsítja a szubsztrátumot. Ebből a mozgási energiából adódóan az ütközések hatására az anyagban erőteljes roncsolás megy végbe. Alacsony recirkulációs szám esetén hatékony a

kezelés, a recirkulációk száma már nem növeli tovább a felületújító hatást. Kis fordulatszámon az alacsony mozgási energiával rendelkező mozgó szubsztrátumnak többszöri ütköztetésre, recirkulációra van szüksége a hatékonyabb alapanyag feltáráshoz.

A folyadéknyíró és ütközéses elven működő berendezéssel kezelt búzaszalma statisztikai elemzése megfelelő. Az anaerob rothasztás során termelt biogáz- és metán többlet várható értékének becsült regressziós függvényei megbízhatóan alkalmazhatók.

## **5.2. Szennyvíziszap fermentlé utófermentációjának összegzése**

### *5.2.1. Biogáz és metánhozam*

A kezelt fermentlé minden esetben többlet gázt és többlet metánt eredményezett. A szubsztrátum kezelése jelentős gázhozam (16,8–23,9%) és metánhozam (75,7–93,9%) növekedést eredményezett.

A magas fordulatszámnál végzett nagy recirkuláció S2 mintája (2500 fordulat/min; 9 recirkuláció) mutatta a legmagasabb gáz (23,9%) és legmagasabb metánhozam (93,9%) többlet értéket.

A gázhozam többlet esetében az alacsonyabb fordulatszámon a kisebb recirkulációs számmal végzett kezelés bizonyult hatékonyabbnak. A nagyobb metántöbbletet minden esetben a magas recirkulációs számú kezelés eredményezte.

A gázhozam többlet %-os eltéréséhez képest a metántöbblet % növekedést ért el minden minta esetében. Tehát a kezelés nem csak a gázhozamot növeli, hanem a gázösszetételt (a biogáz %-os metán értékét) is jelentősen javítja. A metánhozamok átlag %-os vizsgálata is ezt támasztja alá. Legjelentősebb gázminőségi változás a nagyobb recirkulációs számmal kezelt értékeknél adódik. Ez látszik az 58. és 59. ábrán, ahol a biogáz és metánhozam %-os eltérései nem azonosan alakulnak.

Kiugró eltérés az S4 (1600 fordulat/min; 9 recirkuláció) esetében mutatkozik. Az S4 paraméterekkel beállított kezelés a gázhozamot – viszonylag alacsony 20,0%-ról 85,5%-os magas metántöbblet eltérésre módosította. Azaz a hozam eltérése alacsonyabb volt, mint az S3 értékű mintáé, viszont a metántöbblete magasabb. Ugyanez a viselkedés figyelhető meg a centrumpont esetében is. A gázhozam eltérés 16,8%-os értéke a legalacsonyabb szintű, míg a metánhozam eltérés 77,1%-os.

### *5.2.2. A degradáció időbeli lezajlása*

A kezeletlen szubsztrátum hozamértékeit az egyes kezelt minták biogáz (3–5 nap) és metán (1–2 nap) termeléseinek közel azonos időbeli sorrendben érik el. Mindkét hozam vizsgálata esetében leggyorsabban az S2 minta (2500 fordulat/min; 9 recirkuláció) lépi túl a kezeletlen szubsztrátum hozam értékét, ami azt igazolja, hogy Shark berendezéssel történő előkezelés esetén a legnagyobb fordulatszám és a legnagyobb recirkuláció okozza nem csak a legnagyobb hozamokat, de a leggyorsabb degradációt is.

Megállapítható továbbá, hogy a metánhozam átlagosan hamarabb érte el a kezeletlen minta értékét, mint a biogáz hozam a rothasztás során.

### *5.2.3. A fermentációs rothasztási eredményt igazoló vizsgálatok*

Az egyes kezelésekkel mért kezdeti pH érték változások megegyeznek a degradáció végén mért metánhozamok által kapott változással, igazolva ezzel, hogy nagyobb pH értékű alapanyagból nagyobb %-os metán értékű biogázt nyerhetünk. A fermentáció előtti kezelt minták 8,08 és 8,39 érték közöttiek, míg a kezeletlen minta pH = 7,52 értéket vett fel. Látható, hogy a berendezéssel történő kezelés azonnal, még a fermentáció előtt kémiai változást idéz elő a szubsztrátumban.

A kezeletlen minta számított, átlagos metán koncentráció értékénél (34,7%) jelentősebb eltérést mutatott a kezelt minták metán koncentráció értéke (46,9–48,9%). Ebből adódik, hogy a fermentáció végére a biogáz hozamtöbblet képest növekedés következett be a metántöbblet értékeknél. Az eltérés növekedését a biogáz minőségének javulása okozza, amit a fent említett kémiai változás is alátámaszt.

### *5.2.4. Energiamérleg*

A mért értékek alapján megállapíthatom, hogy a beállított paraméter határok között az energiamérleg felvesz negatív és pozitív értéket is. A recirkuláció vizsgált tartománya felső határát közelítve, a 9-szeres recirkuláció környékén a mérleg már negatív, a kezelés során befektetett energia értéke meghaladja a kezelés által nyerhető energia többlet értékét. A recirkuláció 6-os és 3-as beállítása esetében az energiamérleg pozitív. A legnagyobb energianyereség (1,45-szörös) a kis fordulatszám – kis recirkulációs (S3) értékek beállítása mellett kapható.

### *5.2.5. Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálati összegzése szennyvíziszap fermentlé utófermentációja szempontjából*

A biogáz hozam esetén 95%-os szignifikancia szinten hatást mutat az eredményekre a fordulatszám – recirkuláció kölcsönhatása és a recirkuláció. A kísérleti beállítások által meghatározott térben a nagyobb recirkuláció eredményez nagyobb gázhozamot.

Alacsony fordulatszám esetében a recirkulációk száma elhanyagolható befolyással van a gázhozamra. A folyadéknyírás és az ütközéses roncsolás alacsony kerületi sebesség értékek esetén nem jelentős, hiába ismétljük meg az eljárást többször is.

Magas fordulatszám értéken vizsgálva a nagy recirkuláció beállítások mellett adódik a nagy értékű biogáz hozam többlet. A felső fordulatszám tartománya körül a berendezés már jelentős sebességre gyorsítja az alapanyagot. Ez teszi hatékonyabbá a folyadék és a szilárd részecske felületén keletkező

folyadéknírást, valamint az anyag állófelülethez történő ütközéses roncsolását. Így a művelet ismétlésének száma már befolyásolja a vizsgált kimeneti értéket, amely növelésével nő a hozam is.

A metánhozam esetén 95%-os szignifikancia szinten hatást mutat a recirkuláció, mely értékének növelésével nő a metánhozam is. A fordulatszám megközelíti a 95%-os szignifikancia határt. Nagyobb fordulatszám eredményez nagyobb metánhozamot. A legmagasabb elérhető többlet metán magas fordulatszám – nagy recirkulációs beállításokkal adódik. A recirkuláció – fordulatszám kölcsönhatása indifferens a metántöbblet szempontjából.

A folyadékníró és ütközéses elven működő berendezéssel kezelt szennyvíziszap fermentlé statisztikai elemzése megfelelő. Az utófermentációja során termelt biogáz és metántöbblet várható értékének becsült regressziós függvényei megbízhatóan alkalmazhatók.

### **5.3. Mezőgazdasági fermentlé utófermentációjának összegzése**

#### *5.3.1. Biogáz és metánhozam*

A kezelt fermentlé minden esetben többlet gázt és metánt eredményezett. A minták jelentős gázhozam (6,7–16,5%) és metántartalom (24,2–35,7%) növekedést mutattak. A nagy fordulatszámú végzett kis recirkulációval kezelt S1 minta (2500 fordulat/min; 3recirkuláció) mutatta a legmagasabb gáz és metánhozam többletet a kezeletlen minta hozamaihoz képest.

A kisebb fordulatszámú is a kevesebb recirkulációval kezelt alapanyag mutatott nagyobb gáz és metánhozam növekedést. A centrum pont gáz és metántermelése a kezelt minta hozam szélső értékei közé esett.

A kezelt minta metánhozam többlet %-os értéke minden esetben nagyobb a minta biogáz hozamtöbblet %-os értékénél. Ez azt jelenti, hogy nem csak a hozam növekedett a kezelés hatására, hanem a gáz minősége is jelentősen javult. A nagy recirkuláció és nagy fordulatszám beállítás kedvező a minőségi javulás szempontjából. Ebben az esetben a vizsgált S2 minta (2500 fordulat/min; 9 recirkuláció) 6,7%-os gázhozam és 28,5%-os metántöbblet értékű.

#### *5.3.2. A degradáció időbeli lezajlása*

Kezelt minták gáztermelése a 3–5. nap között, a metántermelése a 2–3. nap között éri el a kezeletlen minta által 8. napig termelt értéket. Minden esetben leggyorsabban az S1 minta (2500 fordulat/min; 3 recirkuláció) lépte túl a kezeletlen minta elért biogáz és metánhozam értékét. Mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum esetén a nagy fordulatszám és a kis recirkuláció együttesen okozza a leggyorsabb metán degradációt.

Megállapítható, hogy a rothasztás során a metánhozam átlagosan hamarabb érte el a kezeletlen minta értékét, mint a biogáz hozam.

### 5.3.3. *A fermentációs rothasztási eredményt igazoló vizsgálatok*

A berendezéssel történő kezelés azonnal, még a fermentáció előtt kémiai változást okoz a fermentlében. A kezelt minták pH = 8,19–8,47 érték közé estek, magasabb értéket felvéve, mint a kezeletlen fermentlé által meghatározott pH = 7,80 érték.

A kezelt szubsztrátum minták által termelt biogáz átlagos metán koncentrációja 46,9–49%. A kezeletlen szubsztrátum átlagos metán koncentrációja a degradáció során ezen értékek alatt maradt (42,8%). Ebből az következik, hogy az alapanyag kezelése átlagosan 4–6%-os metán koncentrációnövekedést eredményez. Ezt igazolja a szubsztrátum kémiai változása is, miszerint a gáz minősége a kezelés hatására javult, magasabb pH értékű alapanyagból fajlagosan több metánt tartalmazó biogázt nyerhetünk.

### 5.3.4. *Energiamérleg*

A mért értékek számításai alapján megállapíthatom, hogy az energiamérleg az S3 minta kivételével negatív értékre adódott. A legkevesebb energiavesztés az S3 minta (1600 fordulat/min; 3 recirkuláció) fermentálása mutatta. Ebből látható, hogy bár a biogáz és metánhozamok alapján az S1 minta (2500 fordulat/min; 3 recirkuláció) mutatta a legjobb értéket, az energetikai vizsgálat során a fordulatszám okozta fogyasztásnövekedés miatt, az S3 beállítás a legkedvezőbb.

### 5.3.5. *Mechanikus aprítóberendezés hatékonyságának vizsgálati összegzése mezőgazdasági fermentlé utófermentációja szempontjából*

Mind a biogáz, mind a metántöbblet 95%-os szignifikancia szinten csak a recirkuláció mutat hatást. A kísérleti térben meghatározott értékek között a recirkuláció és a biogáz hozam között fordított arányosság van. A kisebb recirkuláció eredményez nagyobb gáz és metánhozamot. A roncsolás nagyszámú kezelés ismétlés (recirkuláció) esetén olyan nagymértékű, ami már a mikrobák sérülését és pusztulását is előidézi. A fermentációra, ezáltal kedvezőtlen befolyással bír. Üzemviszonyok esetén is jelentős, hogy a berendezés kevesebb recirkulációval képes (metán) energiatöbblet nagyobb értékű előállítására.

A fordulatszám és a recirkuláció kölcsönhatása sem a biogáz sem a metántöbblet-re nincs hatással.

A metántöbblet esetében a fordulatszám megközelíti a 95%-os szignifikancia határt. Nagyobb fordulatszám nagyobb metánhozamot eredményez.

A folyadéknyíró és ütközéssel működő berendezéssel kezelt mezőgazdasági fermentlé statisztikai elemzése megfelelő. Az utófermentációja során termelt biogáz és metántöbblet várható értékének becslés regressziós függvényei megbízhatóan alkalmazhatók.

#### 5.4. Vizsgált szubsztrátumok fermentációjának összehasonlítása

A korábbi fejezetekben ismertetett eredmények és értékelések alapján összeállítottam az előkezelés vizsgált faktorainak szubsztrátumonkénti viselkedését.

18. táblázat Az előkezelés vizsgált tényezőinek hatása az egyes szubsztrátumok szerint

	Biogáz szempontból szignifikáns	Metán szempontból szignifikáns	Áztatási idő hatása	Recirkuláció hatása	Fordulatszám hatása	Fordulatszám-recirkuláció kölcsönhatása
<b>Búzaszalma</b>	recirkuláció, áztatási idő	recirkuláció, áztatási idő, fordulatszám x recirkuláció	egyenes arány	egyenes arány		nagy recirkuláció-kis fordulatszám vagy kis recirkuláció-nagy fordulatszám a kedvező
<b>Szennyvíz-iszap fermentlé</b>	fordulatszám x recirkuláció, recirkuláció	recirkuláció	—	egyenes arány	egyenes arány	kis fordulatszám esetén indifferens a recirkuláció száma, nagy fordulatszám nagy recirkuláció a kedvező
<b>Mezőgazdasági fermentlé</b>	recirkuláció	recirkuláció	—	fordított arány	egyenes arány	nincs kölcsönhatás a fordulatszám és a recirkuláció között

Az összehasonlítás célja a metánhozam növelését befolyásoló faktorok vizsgálata. A korábban meghatározott paraméterek közül a 18. táblázatban zölddel jelölt cellák mutattak szignifikanciát a metánhozam esetében.

A recirkuláció minden esetben szignifikánsnak mutatkozott. Egyenes arányosság van a búzaszalma és a szennyvíziszap fermentlé kezelésénél, ellenben fordított arányosság tapasztalható a mezőgazdasági fermentlé esetén. Az egyenes arányosság kedvezőtlen a berendezés használata során felvett energia szempontjából.

A recirkuláció – fordulatszám kereszt hatás csak a búzaszalma szubsztrátum fermentációjánál szignifikáns. Az aprítási energia szempontjából ez esetben a kis recirkuláció – nagy fordulatszám mellett történő alkalmazása az ideális.

A búzaszalma kezelés szignifikáns hatásai közé tartozik az áztatási idő is. Ez a paraméter ugyanakkor nincs hatással a berendezés üzemeltetési költségeire.

19. táblázat Fermentáció során kapott eredmények az egyes szubsztrátumok szerint

	Többszörös gázhozam	Többszörös metánhozam	Degradációs gázhozam intenzitás (kezeletlen)	Degradációs metánhozam intenzitás (kezeletlen)	A biogáz átlag metánkoncentrációja (kezeletlen)
<b>Búzaszalma</b>	4-50%	4-70%	6-14 nap (16)	5-12 nap (16)	53-60% (53,6%)
<b>Szennyvíz-iszap fermentlé</b>	16,8-23,9%	75,7-93,9%	3-5 nap (9)	1-2 nap (9)	46,9-48,9% (34,8%)
<b>Mezőgazdasági fermentlé</b>	6,7-16,5%	24,2-35,7%	3-5 nap (8)	2-3 nap (8)	46,3-49% (42,8%)

A korábbi fejezetekben taglalt kimeneti vizsgált paraméterek alapján összeállítottam szubsztrátumonként a fermentáció során kapott értékeket (19. táblázat).

Az összegyűjtött adatok alapján az alábbi megállapításokat tettem:

- A kezelés a biogáz többlet szempontjából legeredményesebben a búzaszalmára hatott.
- A kezelés hatására a termelt metántöbblet a szennyvíz fermentlé esetében volt a legnagyobb.
- A gázhozam időbeli intenzitása mindhárom szubsztrátumra nézve kedvezően alakult.
- A metánhozam időbeli intenzitás vizsgálata során a szennyvíziszap fermentlé bizonyult a legeredményesebbnek.
- A kezeletlen mintához képest, a kezelt minták rothasztása során termelt biogáz átlagos metánkoncentráció növekedése a szennyvíziszap fermentlé esetében volt a legjelentősebb.

## Új tudományos eredmények, tézisek

Értekezésem új tudományos eredményének tartom

- annak mérésekkel történő bizonyítását, hogy az előkezelt búzaszalma szubsztrátum esetében, a vizsgált kísérleti térben a biogáz és metánhozamot pozitívan befolyásolja az alapanyag kezelését megelőző áztatási idő és a recirkuláció száma, míg ezt a kezelt alapanyag szárazanyag-tartalma nem befolyásolja,
- a biogáz és metántöbbslet várható értékek becsült regressziós függvényeinek meghatározását mérési eredmények alapján, kísérleti térben,
- annak kísérletekkel történő igazolását, hogy a folyadéknyrás és ütközés elvén előkezelt mezőgazdasági fermentlé utófermentálása során a biogáz és metán hozamot fordított arányban befolyásoló tényezőként kell figyelembe venni a recirkulációt,
- annak igazolását, hogy a kísérleti térben meghatározott paraméterekkel történő előkezelés a szennyvíztelepi fermentlé és mezőgazdasági fermentlé esetében azonnali kémiai változást idéz elő, magasabb metántöbbslet-érték érhető el a biogáz hozamtöbbslet értékénél, és a gázhozam növekedéssel a gáz minősége (metánkoncentráció) is jelentősen javul.

A tudományos eredmények tézisekkel történő igazolása:

### 1. tézis

**Megállapítottam, hogy a folyadéknyrás és ütközés elvén működő berendezéssel előkezelt búzaszalma szubsztrátum esetében a vizsgált kísérleti térben a biogáz és metánhozamot befolyásoló tényezők: az alapanyag kezelését megelőző áztatási idő és a recirkuláció száma.** Ezen paraméterek értékeinek növelésével nőnek a hozamértékek is. A metánhozam vizsgálata esetében további befolyásoló tényezőként jelentkezik a fordulatszám és a recirkuláció kölcsönhatása. Magas metánhozam többsletet a kis recirkuláció – magas fordulatszám, valamint a nagy recirkuláció – alacsony fordulatszám együttes alkalmazása eredményez. **A kezelt alapanyag szárazanyag-tartalma indifferens a fermentáció biogáz és metánhozama szempontjából. A mérési eredmények alapján meghatároztam a kísérleti térben a biogáz és metántöbbslet várható értékének becsült regressziós függvényeit.** [113,115]

### 2. tézis

A folyadéknyrás és ütközés elvén működő berendezéssel előkezelt búzaszalma szubsztrátum esetében a vizsgált kísérleti térben a minták fermentációs metántöbbsletének energiamérlege alapján megállapítottam, hogy a búzaszalmát nagy áztatási idő után gazdaságos kis



**recirkulációval előkezelti úgy, hogy a berendezés alacsony fordulatszámon üzemeljen.** Ezek a paraméterek nem egyeznek meg a legnagyobb metántöbbletet produkáló minta paramétereivel (kis szárazanyag-tartalom; nagy áztatási idő; kevés recirkuláció; alacsony fordulatszám). [115]

### **3. tézis**

**Megállapítottam, hogy a folyadéknyírás és ütközés elvén működő berendezéssel előkezelt szennyvíztelepi fermentlé utófermentálása során a vizsgált kísérleti térben a biogáz és metánhozamot befolyásoló tényező a recirkuláció. A hozamokkal a recirkuláció egyenes arányban van, növelésével nő a hozam értéke is. A gázhozamra hatással van továbbá a fordulatszám – recirkuláció kölcsönhatása.** Alacsony fordulatszám esetében a recirkulációk száma elhanyagolható tényező, magas fordulatszám értéken vizsgálva nagy recirkuláció mellett adódik biogáz hozam többlet. **A mérési eredmények alapján meghatároztam a kísérleti térben a biogáz és metántöbblet várható értékének becsült regressziós függvényét.**

### **4. tézis**

A folyadéknyírás és ütközés elvén működő berendezéssel **előkezelt szennyvíztelepi fermentlé szubsztrátum** esetében a vizsgált kísérleti térben a minták utófermentációs metántöbbletének **energiamérlege alapján megállapítottam, hogy legtöbb energia alacsony fordulatszámon, kis recirkulációs számmal végzett kezeléssel nyerhető.** Ezek a paraméterek nem egyeznek meg a legnagyobb metántöbbletet mutató minta paramétereivel (nagy fordulatszám; nagy recirkulációs szám).

### **5. tézis**

**Megállapítottam, hogy a folyadéknyírás és ütközés elvén működő berendezéssel előkezelt mezőgazdasági fermentlé utófermentálása során a vizsgált kísérleti térben a biogáz és metánhozamot befolyásoló tényező a recirkuláció.** Mindkét hozam esetében a **recirkuláció fordítottan arányos.** Alacsony recirkuláció eredményezi a magas gáz- és metánhozamot. **A metánhozam esetén a fordulatszám alulról megközelíti a szignifikancia határt.** A metánhozam értékével **egyenes arányban van a fordulatszám.** Magas fordulatszám nagy metánhozamot, alacsony fordulatszám kis metánhozamot eredményez. **A mérési eredmények alapján meghatároztam a kísérleti térben a biogáz és metántöbblet várható értékének becsült regressziós függvényét.**

### **6. tézis**

A folyadéknyírás és ütközés elvén működő berendezéssel **előkezelt mezőgazdasági fermentlé szubsztrátum** esetében a vizsgált kísérleti térben a minták utófermentációs metántöbbletének **energiamérlege alapján minden beállítás esetében energiaveszteséget állapítottam meg.** A legjobb befektetett-nyert energia arány **alacsony fordulatszámon, kis recirkulációs számmal végzett**

**kezeléssel nyerhető.** Ezek a paraméterek nem egyeznek meg a legnagyobb metántöbbletet produkáló minta paramétereivel (nagy fordulatszám; kis recirkulációs szám).

#### **7. tézis**

**A folyadéknyírás és ütközés elvén működő berendezéssel történő előkezelés** a kísérleti térben meghatározott paraméterekkel **a szennyvíztelepi fermentlé és mezőgazdasági fermentlé esetében azonnali** szignifikáns **kémiai változást** (mindkét alapanyagnál átlag  $\text{pH} = +0,5$ ) **idéz elő.** Mindkét szubsztrátum utófermentálása során magasabb a metántöbblet százalékos értéke a biogáz hozam többlet százalékos értékénél. A kezelés hatására nem csak a gázhozam növekedik ezen alapanyagok esetében, hanem **a gáz minősége** (metánkoncentráció) is **jelentősen javul.**

## **Az eredmények hasznosítási lehetősége**

Mindennemű energetikai kutatás és annak eredménye nagymértékű figyelmet érdemel. A fosszilis és a nukleárisenergia segítségével nyert energia fajtákon túl, nagy érdeklődés övezi a megújuló energiaforrás alkalmazásának lehetőségeit. Hazánk földrajzi-gazdasági adottságai tekintetében a jelentős mennyiségű biomassza, szennyvíziszap, vagy mezőgazdasági hulladék mindegyike az anaerob fermentáció alapanyagait biztosíthatja. A jelenleg is üzemelő biogáz telepek száma a lehetőségekhez képest méltánytalanul kicsi. Az üzemekben az adott mennyiségű szerves alapanyagból termelt biogáz és metánhozam növelés elsődleges szempont. A kiszámíthatóan magas hozamot eredményező technológia serkenti a létesítői beruházói kedvet, üzemi alkalmazása növeli a működtetés gazdaságosságát.

A laboratóriumi fermentációs kísérletek eredményeit teljes felelősséggel kijelentve nem lehet nagyüzemi körülményekre is automatikusan adoptálni. Az üzemi alkalmazás megbízható eredményéhez szükség van a kísérletek félüzemi vizsgálataira, majd nagyüzemi próbaüzemére. A laboratóriumi vizsgálatok ugyanakkor alkalmasak a kezelt és kezeletlen alapanyag fermentációjának összehasonlítására, a kezelés hatékonyságának feltérképezésére.

A laboratóriumi mérések alapján meghatározhatók az alapanyag és a berendezés alkalmazásának a biogáz hozamra tett befolyásoló tényezői és jellemzői. Az energiamérleg ismeretében pedig meghatározhatók a reális alkalmazhatósági határok.

A folyadéknyírás és ütközés elvén működő berendezés a vizsgált szubsztrátumokat feldolgozó üzemek technológiai folyamatába építve az adott üzem hatékonyságát jó biztonsággal növeli. A kezelés a degradációs folyamatot felgyorsítja, a hidraulikus tartózkodási időt töredékére csökkenti.

A fent leírtak alapján mindenképpen érdemes félüzemi, majd nagyüzemi paraméterekkel megvizsgálni a berendezést. A laboratóriumi kísérletek és a számítások megalapozottá teszik az üzemi alkalmazhatóságát.

Az energiamérleg és a kezelést befolyásoló tényezők összehangolásával nagyobb mennyiségű hazai energiaforrás: biogáz nyerhető. Alkalmazásával serkenthető a biogáz üzemek létesítésének szándéka, csökkentve ezzel a hazánk energia-kiszolgáltatottságát.

## **Függelék, az anaerob degradáció fogalomtára**

### **Anaerob kezelés**

Levegőtől (oxigén) elzárt biotechnológiai folyamat, amelynek célja a szerves anyagok lebontása és eközben biogáz előállítása.

### **Anaerob degradálódás**

A szubsztrátumok vagy koszubsztrátumok mikrobiológiai lebomlásának mértéke, általában biogáz keletkezési potenciálként kifejezve.

### **Batch mérés (Szakaszos vizsgálat)**

Olyan nem folytonos vizsgálatok, amelyekben szerves szubsztrátumokat és koszubsztrátumokat fermentálnak a vizsgálat kezdetén meghatározott állandó paraméterekkel, anaerob körülmények között. Ebből nyerhető információ a fermentációról, inhibícióról, valamint a gázhozamról.

### **Biohulladék**

Aerob vagy anaerob körülmények között bontható anyag, például étel és kerti hulladék, mezőgazdasági és háztartási szerves hulladék.

### **Biogáz**

Az anaerob fermentáció gázterméke, amely elsődlegesen metánt és szén-dioxidot tartalmaz. A szubsztrátumtól függően összetételében található még ammónia, hidrogén-szulfid, vízgőz és más gáz vagy illékony komponens.

### **Biogáz hozam**

Biogáz mennyisége egységnyi mennyiségű szubsztrátum betáplálása esetén.

Mértékegysége:  $\ell_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$ -ben vagy  $\ell_N/\text{kg}_{\text{FM}}$ -ben

$\ell_N$  – standard liter vagy liter normál körülmények között

### **Biogáz keletkezési potenciál**

A lehetséges maximális biogáz hozam, amely egy meghatározott mennyiségű szubsztrátumból ered.

Mértékegysége:  $\ell_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$ -ben.

### **Biogáz mennyiség**

Egységnyi térfogatban kialakult biogáz mennyisége.

Mértékegysége:  $\ell_N$ -ben.

### **Biogáz szint**

Időegység alatt gyártott biogáz mennyisége.

Mértékegysége:  $\ell_N/\text{nap}$ -ban.

### **Biogáz szint, specifikus (biogáz termelékenység)**

A biogáz szint és a fermentor nettó (aktív) fermentációs térfogatának aránya.

Mértékegysége:  $\ell_N/(\ell \cdot \text{nap})$ -ban.

## **Fermentálás**

Olyan anaerob kémiai (biotechnológiai) folyamat, amely során mikroorganizmusok közreműködésével, vagy enzimeik segítségével szerves anyagból létrejött termék: a metánt tartalmazó biogáz állítható elő. Szennyvíz esetében gyakran rothasztásként emlegetik.

## **Fermentált iszap**

Anaerob rothasztás utáni szennyvíz iszap.

## **Fermentor térfogata**

A fermentor (reaktor) térfogata, amelyben a fermentálás történik.

## **Fermentációs maradék (residue)**

Fermentálás után maradó szilárd vagy folyékony anyag.

## **Fermentációs vizsgálat (test)**

Szakaszos vizsgálat; olyan precízen dokumentált eljárás, mely a DIN 38414–8 ajánlásainak megfelel.

## **Fermentációs viselkedés**

Annak a folyamatnak a jellemzője, amely során a szubsztrátumból biogáz keletkezik.

## **Fermentációs kísérlet**

Szerves anyag anaerob rothasztására vonatkozó vizsgálata.

## **Gázképződés**

A gázhozam értéke a specifikus szakaszos vizsgálat során adott idő alatt.

Mértékegysége (például) :  $\ell_N/\text{kg}_{\text{OTS}}$ -ben (21 nap alatt).

## **Inhibíció (Gátlás)**

Fermentálás meggátolása azáltal, hogy az aktív mikroorganizmusokat károsítják, vagy az enzimek hatékonyságát (aktivitását) csökkentik.

## **Homogenitás és inhomogenitás**

Egy anyag, vagy jellemző homogén vagy inhomogén eloszlásának mértéke. Egy anyag lehet homogén egy komponensre és lehet inhomogén egy másikra.

## **Hidraulikus tartózkodási idő**

Az az átlagos idő, ameddig a szubsztrátum a fermentorban marad. Folyamatos üzemet tekintve a betáplált szubsztrátum térfogatának és a fermentor térfogatának a hányadosa naponta.

Mértékegysége lehet például napban megadva.

## **Kémiai oxigénigény (KOI) (chemical oxygen demand, CSB; COD)**

A szubsztrátumban levő oxidálható elegy tartalmának mérése.

## **Metán produktivitás, specifikus**

Egységnyi idő alatt termelt metán mennyiségének és a fermentor nettó működési térfogatának aránya.

Mértékegysége:  $\ell_{\text{N,CH}_4}/(\ell \cdot \text{d})$ -ben.

### **Mintavételezés**

Olyan módszer, amely során a szubsztrátum vagy a fermentor tartalmának részeit kiveszik és előkészítik, hogy lényeges és reprezentatív megállapításokat tegyenek a teljes mennyiség kémiai vagy biológiai paramétereiről.

### **Minta előkészítés**

A reprezentatív mintához vagy a fermentációs kísérlethez szükséges minta előállítása elválasztás, méret csökkentés, osztályozás (szitával), stb. által.

### **Mintatárolás (sample storage)**

Az a dolog, amely során a mintavételi és a minta-előkészítési idő közötti, valamint a kémiai vagy biológiai analízisekben használt minta ideje közötti periódust áthidaljuk.

### **Oltóiszap (inoculum)**

Az a mikrobiológiai biomassza, amelyet a fermentálás elején adnak hozzá a szubsztrátumhoz. Szükség van rá a fermentálási folyamatok beindítására, gyorsítására. A DIN 38414–8 szennyvíziszapként hivatkozik, ha ettől különböző, akkor szigorúan dokumentálni kell.

### **Organoleptikus (érezékszervi) minta vizsgálat**

Minta tulajdonságainak leírása érzékeléssel, pl. illat, szín, zavarosság vagy sűrűség megállapítása emberi érzékszervek segítségével.

### **Összes szilárd anyag szárazanyag tartalma (TS)**

g/kg-ban, magas víztartalom esetén g/l-ben vagy a teljes mennyiség %-ában.

A víz termikus úton történő eltávolítása után megmaradt anyagok mennyisége. 105 °C-on 24 órán át történő szárítás vagy konstans tömeg eléréséig történő szárítás.

### **Referencia szubsztrátum és referencia minta**

Szubsztrátum ismert biogáz potenciállal. (pl. mikrokristályos cellulóz)

### **Szerves szárazanyag-tartalom (oTS)**

$g_{oTS}/kg_{FM}$  -ben ;  $g_{oTS}/l_{FM}$ -ben; %-ban

A minta térfogatának vagy tömegének súlyvesztesége, amelyet azalatt érünk el, amíg konstans tömeget nem kapunk, 550 °C hőmérsékleten hamuvá alakítva. A súlyveszteség túlnyomóan, de nem teljesen a szerves alkotók miatt történik. Az illékony szerves komponensek, amelyek 105 °C-on elillannak, ezzel a módszerrel nem regisztrálhatók, külön szükséges a meghatározásuk.

### **Szolubilizáció**

Hatékony tápanyag felszívódás.

### **Szubsztrátum**

A fermentálás nyersanyaga.

### **Vakminta**

Szubsztrátum nélküli, tisztán oltóiszappal történő fermentálás.

## Hivatkozott irodalom

- [1] Market observatory for energy: EU 27 energy key figures- European commission. [http://ec.europa.eu/energy/observatory/countries/doc/key\\_figures.pdf](http://ec.europa.eu/energy/observatory/countries/doc/key_figures.pdf), p.: 40. [Online] 2010. június. [Hivatkozva: 2014. 02 11.]
- [2] Eurostat European Commission: Energia, transport and environment indicators. Eurostat Pocketbooks: [Online] 2010. [Hivatkozva: 2014. 01. 11.] ISSN 1725–4566.
- [3] Központi Statisztikai Hivatal: Statisztikai Tükör, Az energiaárak alakulása.[Online] <http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/stattukor/energiaarak0409.pdf>., [Online] 2010. IV. évfolyam 58-as szám. [Hivatkozva: 2013. 12. 13.]
- [4] Központi Statisztikai Hivatal: A fenntartható fejlődés indikátorai Magyarországon <http://pdc.ceu.hu/archive/00005356/01/fenntartfej106.pdf>., [Online] 2010. [Hivatkozva: 2013. 11. 02.]
- [5] Energiagazdálkodási Tudományos Testület, ETE Energetikai Sajtófigyelő, <http://www.ete-net.hu/index.php/aktualis-r/a-vilag-hirei-r>., [Online] 2014. június.
- [6] Központi Statisztikai Hivatal: Település Statisztikai Rendszer. [http://www.ksh.hu/docs/hun/terinform11/pdf/terinf\\_2011.pdf](http://www.ksh.hu/docs/hun/terinform11/pdf/terinf_2011.pdf)., [Online] 2011. [Hivatkozva: 2013. 04. 05.]
- [7] Kormány Rendelet, (111/2003. (VII.29.) *Korm. Rendelet a földgazellátásról szóló 2033. évi XLII. Törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról*, Budapest, 2003.
- [8] Dr. Bai A. (szerk): A biogáz, Budapest, Száz Magyar Falu Könyvesháza Kht., 2007.
- [9] Dr. Petits M.: Szerves hulladékok újrahasznosítása. [http://www.agraroldal.hu/biomassza-2\\_cikk.html](http://www.agraroldal.hu/biomassza-2_cikk.html)., [Online] 2011. 11. 24. [Hivatkozva: 2013. 02 14.]
- [10] Horváth M., Bakosné Diószegi, M.: Biogáz üzem típusok Magyarországon – lehetőségek és buktatók, XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó Konferencia-kiadványa, Románia, 2013 pp.:162–165. ISSN 2068–1267.
- [11] Kramer A.: Erneuerbare Energien in Deutschland auf einen Blick, Budapest : Német-Magyar Ipari és Kereskedelmi Kamara, „Bioenergia – a jövő energiaforrása” c. konferencia, 2012.10.16.
- [12] Dr. Barótfi I.: Környezettechnika, Budapest 2002., Mezőgazda Kiadó, ISBN: 9632860098.
- [13] Biogas barometer. <http://www.euroserv-er.org/downloads.asp>., [Online] 2010. [Hivatkozva: 2013. 02 16.]
- [14] Zsuffa L., Konorót F., Oláh J., Pál T., Kapros Z.: Települési szennyvíziszapból előállított biogáz hasznosítása hő és villamos energia termelésére, Budapest 1998., OMFB Tanulmány (EKFM Kft.)

- [15] Zöldtech: Átadták Magyarország legnagyobb biogáz erőművét Szarvason, Sajtóközlemény, <http://zoldtech.hu/cikkek/20110914-Szarvas>., [Online] 2011.09.04. [Hivatkozva: 2013. 08 11.]
- [16] Dr. Petits M.: A nyírbátori biogáz üzem üzemeltetésének tapasztalatai, Budapest, Biogáz konferencia, Renexpo, 2012.05.10.
- [17] Bakosné Diószegi M., Solymosi J.: Növénytermesztési és állattenyésztési „vegyes” gazdaságok hulladékainak energetikai hasznosítása, *Hadmérnök*, 2010. szeptember, V. évfolyam 2. szám pp. 24–37. ISSN 1788–1919.
- [18] Dr. Kovács A.: Az európai biogáz ipar jelenlegi helyzete és jövőbeli kilátásai, Budapest, Renexpo, 2012.05.10.
- [19] *A termőföld védelméről szóló 2007. évi CXXIX. Tv. 49.§ bek.*
- [20] *A terménövelő anyagok engedélyezéséről, tárolásáról, forgalmazásáról és felhasználásáról szóló FVM 36/2006. (V.18.) rendelet.*
- [21] Dr. Kapros T., Dr. Csete J., Szunyog I.: A biogáznak földgáz vezetékbe történő betáplálását befolyásoló műszaki, jogi és pénzügyi szempontok az Európai Unióban. <http://www.bitesz.hu/dokumentumtar/biogaz/biogaz-halozatba-va0-betaplalasanak-kovetelmenyei-/download.html>., [Online] [Hivatkozva: 2014. 04. 10.]
- [22] Dr. Kovács Kornél: A biogáz termelés és hasznosítás tendenciái Magyarországon, „*Bioenergia – a jövő energiaforrása*” c. konferencia, Német – Magyar Ipari és Kereskedelmi Kamara, Budapest, 2012.10.16.
- [23] Szigeti M.; Bakosné Diószegi M.; Dr. Legeza, L.; Dr. Horváth M., "Magyarország hulladékhasznosítási lehetőségei hatékonyabb biogáz termelés céljából," , XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó Konferencia-kiadványa, 2013.
- [24] Bai A.: A biomassa felhasználása, 2002. Budapest, Szaktudás Kiadó Ház, ISBN 9639422460.
- [25] Rebeca Van Acker, Vout Boerjan Ruben Vanholme, "Potential of Arabidopsis systems biology to advance the biofuel field," *Trends in biotechnology*, vol. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.07.08>, pp.:543–547, November 2010.
- [26] Budapesti Műszaki Egyetem, Energetika, bioenergia, [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.] [ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/energ/.../ea\\_003c-energetika\\_bioenergia.ppt](ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/energ/.../ea_003c-energetika_bioenergia.ppt).
- [27] Hendks, A.T.W.M., Zeeman, G.: Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. 100 (2009) pp.: 10–18, *Bioresource Technology*,
- [28] Dr. Molnár S.( etal.): Faipari kézikönyv I., Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron 2000.
- [29] Adler, E.: „Lignin chemistry-Past”, no.11, pp.:169–218., *J. Wood Sci. Technol.*, 1977.
- [30] Szerves Kémia Tanszék: Fahulladékok és mezőgazdasági növényi hulladék anyagok vizsgálata, ELTE Kémiai Intézet, 2007.
- [31] Taherzadeh Mohamad J., Keikhosro Karimi: Pretreatment of lignocellulosic wates to improve ethanol and biogas production: a rewiew. *Molecular Sciences* : [www.mdpi.org/ijms](http://www.mdpi.org/ijms).,ISSN1422-00672008,9, pp.:1621–1651.



- [32] J. Pérez; Muñoz-Dorado, J. De La Rubia T., Martínez, J.: Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview, *Int Microbiol*, 2002.
- [33] A. Barakat; Monlau, F. Steyer, JP. Carrere, H.: Effect of lignin-derived and furan compounds found in lignocellulosic hydrolysates on biomethane production, 104:90e9, *Bioresour Technol*, 2012.
- [34] Fan, L.T., Lee, Y. Beardmore, D.H.: Mechanism of the enzymatic hydrolysis of cellulose: Effects of major structural features of cellulose on enzymatic hydrolysis, *Biotechnol. Bioeng*, 22 (1980) pp.:177–199.
- [35] Wyman, C.E.: *Handbook on bioethanol: production and utilization*, Washington DC, USA, Taylor & Francis, 1996.
- [36] J., Mohammad Taherzadeh, Keikhosro Karimi: Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A Review, [www.mdpi.org/ijms](http://www.mdpi.org/ijms), *International Journal of Molecular Sciences*, ISSN 1422-0067.
- [37] Zeng, M.; Mosier, N.S.; Huang, C.P.; Sherman, D.M.: *Ladisc. Microscopic examination of changes of plant cell structure in corn stover due to hot water pretreatment and enzymatic*, pp.:265–278., *Biotechnol. Bioeng.*, 2007.
- [38] Ramos, L.P., Breuil, C. és Saddler, J.N.: Comparison of steam pretreatment of eucalyptus, aspen and spruce wood chips and their enzymic hydrolysis, *Appl. Biochem. Biotechnol*, pp.:37–48., 1992.
- [39] Mooney, C.A.; Mansfield, S.D.; Touhy, M.G.; Saddler, J.N.: The effect of initial pore volume and lignin content on the enzymatic hydrolysis of softwoods, *Bioresour Technol*, 64 (1998) pp.:113–119.
- [40] Boblter, O.: Hydrothermal degradation of polymers derived from plants, *Prog. Polym.Sci*, 19 (1994) pp.:797–841.
- [41] Garrote, G., Dominguez, H., Parajo, J.C.: Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz Als Roh-und Werkst.*, 57, (1999) pp.:191–202.
- [42] Doansky R., Rendos, F.: On the pyrolysis of wood and its components. 29, (1970) pp.: 473–476, *Holz Roh Werkst*,
- [43] Greg, D., Saddler, J.N.: Techno-economic assessment of the pretreatment and fractionation steps of a biomass-to-ethanol process, pp.: 711–727, *Appl. Biochem. Biotechnol*, 1996.
- [44] Paester, L., Lepers, J.: *Energetische Verwertung von holzartiger Biomasse*, pp.: 14–17, *BWK Brennstoff, Wärme, Kraft*, 2004.
- [45] Toussaint, B., Excollier, G.: Saccharification of steam-exploded poplar wood, *Biotechnology and Bioengineering*, pp.: 1308–1317, 1991.
- [46] Dr. Boros Tiborné: Fa és más, nagy lignocellulóz tartalmú biomasszafajták energetikai hasznosítása. [http://www.omikk.bme.hu/collections/mgi\\_fulltext/energia/2004/12/1206.pdf](http://www.omikk.bme.hu/collections/mgi_fulltext/energia/2004/12/1206.pdf).  
[Online] [Hivatkozva: 2014. 05. 07.]

- [47] Brownell, H., Yu., E.K.C., Saddler, J.N.: Steam-explosion pretreatment of wood: effect of chip size, acid, moisture content and pressure drop, *Biotechnol, Bioeng*, 28, pp.:792–801, 1986.
- [48] Lawter, J.M., Sun, R., Banks, W.B.: Effect of steam treatment on the chemical composition of wheat straw, *Holzforschung*, pp.:365–371, 50, 1996.
- [49] Mosier, N., Hendricson, R., Ho N., Sedlak, M., Ladisch, M. R.: Optimization of pH controlled liquid hot water pretreatment of corn stover, *Bioresour. Technol.*, 96 (2005) pp.: 1986–1993.
- [50] R., Weil J.; A. Sarikaya; S.L. Rau; J. Goebis; C.M. Lasisch; M. Brower; R. Hendrickson; M.R. Tadissch: Pretreatment of corn fiber by pressure cooking in water, 73, (1998) pp.: 1–17, *Appl. Biochem. Biotechnol.*
- [51] Liu, C. ,Wyman, C.E.: The effect of flowrate of compressed hot water on xylan, lignin and total mass removal from corn stover, *Ind. Eng. Chem. Res.* 42 (2003), pp.:5409–5416.
- [52] Benjamin (et al.): Anaerobic toxicity and biodegradability of pulp mill waste constituents, *Water Res.*, pp.: 601–607, 1984.,
- [53] Fenger, D., Wegener, G.: *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions.*, Berlin, New York, 1984.
- [54] Pavlostatihis, S.G., Gosette, J.M.: Alkaline treatment of wheat straw for increasing anaerobic biodegradability, *Biotechnol Bioenergie*, pp.: 334–344, 1985.
- [55] Taherzaden, M. és Karimi, K.: Pretreatment of lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and biogas Production: A Review. *Int. J. Mol. Sci*, pp.: 1621–1651, 2008.
- [56] Abgor, V.B. (et al): Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances*, 29 (2011) pp.: 675–685.
- [57] Zoltán Bagi, Norbert Ács, Balázs Bálint, Lenke Horváth, Krisztina Dobó, Katalin R. Perei, Gábor Rákhely, Kornél L. Kovács: Biotechnological intensification of biogas production, *Appl Microbiol Biotechnol*, *ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY*, pp.: 473–482, DOI 10.1007/s00253-007–1009–6 2007. , 2007. May,
- [58] Hadabásné Szigethy Gy.: Egyéb hulladékkezelési folyamatok, Magyarország, NSZFI, A kiadvány az Új Magyarország Fejlesztési Terv TÁMOP 2.2.1 08/1–2008-0002.
- [59] Mais, U.; Esteghlalian, A.R., Saddler, J.N., Mansfield, S.: Enhancing the enzymatic hydrolysis of cellulosic materials using simultaneous ball milling, *Appl. Biochem. Biotechnol*, 2002.
- [60] Tassinari, T. és Macy, C.: Differential speed two roll mill pretreatment of cellulosic materials forenzymatic hydrolysis, *Biotechnol. Bioeng*. pp.:1321–1330, 1977.
- [61] Sidiras, D.K., Koukios, E.G.: Acid saccharification of ball-milled straw, *Biomass*, p.19., 1989.
- [62] Kumakura, M., Kojima, T. és Kaetsu, I.: Pretreatment of lignocellulosic wastes by combination ofirradiation and mechanical crushing, *Biomass.*, pp.: 299–308, 1982.
- [63] Lafitte-Trouque, S., Forster, C.F.: The use of ultrasound and gamma-irradiation as pre-treatmentsfor the anaerobic digestion of waste activated sludge at mesophilic and thermophilic temperatures. *Bioresource Technol.* 2002., 84, pp.:113–118.

- [64] Eskicioglu, C.; Terzian, N.; Kennedy, K.J.; Droste, R.L.: Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge, *Water Res.* 41 (2007) pp.:2457–2466.
- [65] Negro, M.J.; Manzanares, P.; Ballesteros, I.; Oliva, J.M.: Hydrothermal pretreatment conditions to enhance ethanol production from poplar biomass. *Biochem. Biotechnol.*, 105 (2003) pp.: 87–100.
- [66] Jin, S. Chen, H.: Superfine grinding of steam-exploded rice straw and its enzymatic hydrolysis, 2006., 30., pp.:225–230, *Biochem. Eng. J.*,
- [67] Kim, S., Holtzapfle, M.T.: Effect of structural features on enzyme digestibility of corn stover, *Bioresources technol.*, 97 (2006) pp.:583–91.
- [68] Mohammed, A., Alfarjani, F., Benyounis, KY., Prescott, T., Olabi, AG.: Application of mechanical pretreatment to produce methane from Maize, *Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Int. Conf. Of Efficiency, Cost, Optimization (ECOS) Novi Sad*, 2011.
- [69] S. Tedesco, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi.: Mechanical pretreatment effects on macroalgae-derived biogas production in co-digestion with sludge in Ireland Energy, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/energy](http://www.elsevier.com/locate/energy), 2013.
- [70] Muller, C.D., Abu-Orf, M., Novak, J.T.: Application of mechanical shear in an internal-recycle for the enhancement of mesophilic anaerobic digestion. *Water Environ. Res.* 79 (2007) pp.:297–304.
- [71] Henley, R.G., Yang, R.Y.K., Greenfield, P.F.: Enzymatic saccharification of cellulose in membrane reactors. *Enzyme Microb. Tech.* pp.:206–208., 1980.
- [72] Ancza E.; Bakosné Diószegi M.; Horváth M.: Hydrodynamic cavitation device that makes straw culms suitable for efficient biogas production. pp. 572–576, Malaysia, Kuala Lumpur, *Applied Mechanics and Materials*, 2014.
- [73] H., Carrère; Dumas, C; Battimelli, A; Batstone, D.J.; Delgenés, J.P.; Steyer, J.P.; Ferrer, I.: Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review, [elsevier.com/locate/jhazmat](http://elsevier.com/locate/jhazmat), *Journal of Hazardous Material*, 183 (2010) pp.:1–15.
- [74] S.I. Perez-Elvira, P.N. Diez; F. Fernandez-Polanco: Sludge minimisation technologies, *REV. Environ. Sci. Bio/Technol.* , 2006., 5(4). pp.: 375–398.
- [75] Ge.e, H.Q., Jensen, P.D. Batstone, D.J.: Pre-treatment mechanism during thermophilic-mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge. *Water Res.* 44 (2010)., pp.: 123–130.
- [76] Pécs M.: Feldolgozási műveletek – Sejtfeltárás, BME oktatási anyag.
- [77] Horváth M, Bakosné D, M.: Biogáz hozam növelése kavitációs mező alkalmazásával Románia, Erdély, Kolozsvár, OGÉT, 2012.04., ISSN 2068–1267.
- [78] Horváth M, Bakosné Diószegi M.: Kavitációs mező előállítása szonokémiai reakciókhoz, Románia, Erdély XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó Konferencia-kiadványa, 2011. április, pp.: 168–171 (2011) ISSN 2068–1267.
- [79] Leighton, T. G.: *The acoustic bubble*, London: Academic, 1994., pp.: 531–551.

- [80] Suslick, K. S., Doktycz, S. J.: The effects of ultrasound on solids. In *Advances in sonochemistry* (ed. T. J. Mason) pp.: 197–230., New York: JAI., 1990.
- [81] Pilli Sridhar; Puspendu Bhunia; Song Yan ; R.J. LeBlanc.: Ultrasonic pretreatment of sludge: A review , journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ultsonch](http://www.elsevier.com/locate/ultsonch) : *Ultrasonics Sonochemistry*, 18 (2011) pp.: 1–18
- [82] M.R. Salsabil, A. Prorot, M. Casellas, C. Dagot: Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerob digestibility, *Chem. Eng.J.*, 148 (2–3) (2009) pp: 327–335.
- [83] A. Tiehehm, K. Nickel, U. Neis .: The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge, pp.:121–128, *Water Sci., Technol*, 36 (11) (1997)
- [84] A. Tiehehm, K.Nickel; M. Zelhorn; U. Neis.: Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization, *Water Res.*, The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge, *Water Sci.*, 35 (8) (2001) pp.: 2033–2009.
- [85] Onyeche, T.I.; o. Schlafer; H., Bormann; C., Schroder; M.: Ultrasonic cell disruption of stabilised sludge with subsequent anaerobic digestion, *Ultrasonics* 40, (2002) pp.: 31–35.
- [86] Bien, J. B.; G. Malina; J.D. Bien; L. Wolny.: Enhancing anaerobic fermentation of sewage sludge for increasing biogas generation, *J. Environ. Sci. Health Part A-Toxic/ Hazard. Subst. Environ, Eng.*, 39 (4) 2004. pp.: 939–949.
- [87] Bougrier, C., H. Carrère , J.P. Delgenés: Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment, *Chem. Eng.J.*, 106 (2) 2005., pp.:163–169.
- [88] G. Erden, A. Filibeliu: Ultrasonic, Pre-treatment if biological sludge: consequences for disintegration, anaerobic biodegradability, and filterability, pp.: 145–150, *J. Chem. Technol. Biotechnol*, 85 (1) 2009.
- [89] M. FDz-Polanco; Perez-Elvira, S., F.II. Plaza; G. Garralon, Fdz- Polanco.: Ultrasoun pre-treatment for anaerobic digestion improvement, pp.: 1525–1532, *Water Sci. Technol.*, 60 (6) 2009.
- [90] Nickel, K.: Intensivierung der anaeroben Klaerschlamms stabilisierung durch vorgeschalteten Zellaufschluss mittels Ultraschall 2002. PhD Thesis TUHH .
- [91] Nickel, K., Neis, U.: Intensivierung der Schlammfäulung durch Klaerschlammdesintegration mit Ultraschall. Bremen, Germany : 5.-GVC-Abwasser-Kongress, 2003., Preprints, 1, pp.: 53–62.
- [92] Dr. Németh Zs., Dr. Kárpáti Á.: Anaerob fermentáció hatékonyság-növelése ultrahanggal, Négy év üzemi tapasztalati a Bambergi tisztítóműben, 2009.
- [93] Takács B.; Dr. Németh T. Zs. ; Kiss G.; Krenner R.: Ultrahangos technológia alkalmazása a szombathelyi szennyvíztisztító-telepen, Euro-Open Kft., Zalaegerszeg, Vasivíz Zrt.
- [94] U. Baier, P. Schmiheiny : Enhanced anaerobic degradation of mechanically disintegrated sludge water., pp.: 137–143, *Sci. Technol*, 36 (11) 1997.
- [95] J., Kopp, J. Müller, N. Dightl: Anaerobic digestion and dewatering characteristics of mechanically disintegrated sludge, pp.: 129–136, *Schwedes : Water Sci. Technol.*, 36 (11) 1997.

- [96] M. Dohanyos, J. Zabranska, P. Jenicek: Enhancement of sludge anaerobic digestion by using of a special thickening centrifuge, pp: 145–153, *Water Sci. Technol.*, 36 (11) 1997.
- [97] J. Zabranska; M. Dohanyos; P. Jenicek; J. Kutil.: Disintegration of excess activated sludge-evaluation and experience of full-scale applications, *Water Sci Technol.*, pp.: 229–236, 53 (12) 2006.
- [98] H.B. Choi, K.Y. Hwang, E.B. Shin.: Effect on aerobic digestion of sewage sludge pretreatment, pp.: 207–211, *Water Sci. Technol.*, 35 (10) 1997.
- [99] Nach, I.W., et al.: Mechanical mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process, pp.: 2362–2368, *Water res.*, 34 (8) 2000.
- [100] Bakosné Diószegi M.; Horváth M.; Szigeti M.: *Biogáz alapanyag előkezelés technológiák*. Budapest, Óbudai Egyetem, 2013; p.100. 978–615–5018–95–4.
- [101] Onyece, T.I.: Economic benefits of low pressure sludge homogenization for wastewater treatment plants. New Brunswick, Canada : IWA specialist conferences Moveing forward wastewater biosolids sustainability, 2007.
- [102] J. Muller, L. Pelletier : Desintegration mécanique des boues activées, pp.: 61–66, *L'eau, l'industrie, les nuisances*, 1998. (217).
- [103] M. Engelhart ; M. Mkrüger; J. Kopp; N. Dichtl: Effect of disintegration on anaeribec degradation of sewage sludge in dodownflow stationary fixed film digester, Barcelona, II. International Symposium on anaerobic Digestion of Solid Waste, 1999.
- [104] M. Barjenbruch, O. Kopplow: Enzymatic, mechanical and thermal pretreatment of surplus sludge, pp.: 715–720, *Adv. Environ Res*, 7 (3) 2013.
- [105] VDI 4630: Fermentation of organic materials – Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation test, 2006.
- [106] *Statisztikai Hivatal adatai*, Budapest, 2012.
- [107] E., Billa és B., Monties: Structural Variability of Lignins and Associated Phenolic Acids in Wheat Straw, pp.: 305–314, *Cellulose Chem. Technol*, 1995., 29.
- [108] Zhang, D. Liu, X., Li, Z.: The Analyses of Fiber Morphology and Chemical Composition of the Differents of Wheat Straw, China, *Pulp and Paper*, 1990., pp. 16–21.
- [109] Ernst A. J, Foural, Y., Clark T. F.: "Rice Straw for Bleached Paper", 1960.
- [110] Grace T., Hough G.: 1985 *From Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes*, p. 116, Atlanta, Tappi Press, 1985.
- [111] Jürgen Wiese: *Laboratóriumi analízis és üzemi mérés technika*, Németország, Düsseldorf, Enercess GMBH, Bad OEynhause.
- [112] Kaltwasser, B. J.: *Biogáz-előállítás és hasznosítás*, Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1983.
- [113] Bakosné Diószegi M., Horváth M., Drégelyi-Kiss Á.: Experimental Design and Study of Shear Technology for Biomass Comminuting. Malaysia, Kuala Lumpur, *APPLIED MECHANICS AND MATERIALS*, 2014., 564: pp. 555–559.

- [114] Fizika- Égészők és fűtőértékek. <http://fizika.qwqw.hu/?modul=oldal&tartalom=1113126>.  
[Online] [Hivatkozva: 2014. 05 11.]
- [115] Bakosné Diószegi M., Horváth M.: *Effects of Mechanical Pretreatment on Wheat Straw Fermentation*. International Engineering Symposium at Banki (IESB): Budapest, 2014. november 20. ISBN 978-615-5460-08-1.

## Ábrajegyzék

9. ábra Az EU primer energiaimportjának fő forrásországai 2008-ban.....	8. oldal
2. ábra A megújuló energiaforrásokból megtermelt villamosenergia részaránya %-os értékben..	9. oldal
3. ábra Magyarország energiamérlege.....	10. oldal
4. ábra Az energiafüggőség indikátora: nettó import mennyiség/bruttó belföldi energia felhasználása... .....	11. oldal
5. ábra Gázkutak gyűjtőcsonkja egy működő depóniagáz telepen.....	16. oldal
6. ábra Függőleges elrendezésű rothasztó torony egy szennyvíztelepen.....	17. oldal
7. ábra Mezőgazdasági alapanyaggal üzemelő, lapos elrendezésű biogáz üzem, Kecskemét – Pilze- Nagy Kft.....	18. oldal
8. ábra Biogáz-telep sematikus vázlata.....	19. oldal
9. ábra Előkezelések csoportosítása.....	21. oldal
10. ábra A lignocellulóz felépítése.....	23. oldal
11. ábra A lignin építőelemei.....	24. oldal
12. ábra Iszapkezelési technológiák elhelyezkedése a szennyvíztisztítás folyamatában.....	31. oldal
13. ábra Kavitációs buborék és a megsemmisítő túszerű benyomódás.....	32. oldal
14. ábra A bambergi szennyvíztelepen üzemelő két (Ultrawaves-Sonotronic) ultrahang- reaktor .....	34. oldal
15. ábra Gyöngymalom.....	36. oldal
16. ábra Kolloid malom.....	38. oldal
17. ábra Shark berendezés.....	39. oldal
18. ábra Búzatábla a Dunántúlon.....	41. oldal
19. ábra A szennyvíztelep felépítése, iszaptípusok.....	43. oldal
20. ábra 2,5–5%-os szárazanyag-tartalmú rothasztott iszap.....	44. oldal
21. ábra A dömsödi biogáz telep.....	45. oldal
22. ábra Búzaszalma százalékos méret eloszlása.....	46. oldal
23. ábra Shark nyírótechnológiával működő vizes aprító berendezés.....	47. oldal
24. ábra Aprító egység betöltő tölcsérrel és a kivezető csővel.....	48. oldal
25. ábra Az aprító egység felépítése.....	48. oldal
26. ábra Nyomatékátvitel bemutatása metszeti rajzon.....	49. oldal
27. ábra Nabatherm CE 4/11/R6 típusú kemence és a sorszámozott kerámia edények.....	50. oldal
28. ábra Analitikai mérleg.....	50. oldal
29. ábra Az exszikkátor.....	51. oldal
30. ábra A mérésekhez használt gázkromatográfiás berendezés.....	52. oldal

31. ábra Az inkubátor szekrény és az inkubálást biztosító vizes kád.....	52. oldal
32. ábra A Fermac 320 pH mérője.....	53. oldal
33. ábra Reutsch rázó gép a szitasorral.....	53. oldal
34. ábra A batch mérés jelképes működési ábrája és fényképe.....	54. oldal
35. ábra A sorszámozott kerámia edények a mintákkal.....	57. oldal
36. ábra A fermentlé pH mérése.....	58. oldal
37. ábra A búzaszalma kísérlet anyagáramának és munkafolyamatának lépései.....	60. oldal
38. ábra Shark gépbe történő szubsztrátum adagolás.....	61. oldal
39. ábra A fermentlé Shark-os kezelése.....	62. oldal
40. ábra A fermentlé kísérlet anyagáramának és munkafolyamatának lépései.....	64. oldal
41. ábra A búzaszalma szubsztrátum minták egyes biogáz hozam értékei és a kezeletlen minta biogáz hozam értékeihez mért %-os eltérései.....	65. oldal
42. ábra A búzaszalma szubsztrátum minták gázhozamai és a kezeletlen minta biogáz hozam értékeihez mért %-os eltérései.....	66. oldal
43. ábra Szalma-víz szuszpenzió nedvesedési vizsgálata.....	67. oldal
44. ábra A kezelt szalma-víz minták leszűrt szalma szárazanyag-tartalom értékei.....	68. oldal
45. ábra A kezeléseket után leszűrt búzaszalma levének szerves szárazanyag-tartalom értékei....	68. oldal
46. ábra Az egyes kezeléseket KOI érték eltérései a kezeletlen minta KOI értékéhez képest.....	69. oldal
47. ábra A búzaszalma fermentációját követő pH értékek.....	69. oldal
48. ábra A Shark berendezés teljesítménye 3m <sup>3</sup> /h üzemelés során.....	70. oldal
49. ábra A búzaszalma fermentációs energiamérlege háromszoros recirkuláció esetén.....	72. oldal
50. ábra A búzaszalma fermentációs energiamérlege kilencszeres recirkuláció esetén.....	72. oldal
51. ábra Biogáz és metánhozam többlet Pareto diagramjai a búzaszalma fermentáció 5. napján.....	73. oldal
52. ábra Biogáz és metánhozam többlet Pareto diagramjai a búzaszalma fermentáció 16. napján.....	73. oldal
53. ábra A búzaszalma fermentáció 5. nap utáni főhatások gáz (és metán) hozam többlet alapján.....	74. oldal
54. ábra A búzaszalma fermentáció 16. nap utáni főhatások gáz (és metán) hozam többlet alapján.....	74. oldal
55. ábra A búzaszalma fermentáció 5. nap utáni keresztthatások gáz (és metán) hozam többlet alapján.....	75. oldal
56. ábra A búzaszalma fermentáció 16. nap utáni keresztthatások gáz (és metán) hozam többlet alapján.....	75. oldal
57. ábra Az ANOVA elemzés alkalmazhatóságának igazolása (16. nap metánhozam többlet)...	76. oldal
58. ábra A szennyvíziszap fermentlé minták egyes biogáz hozam értékei és a kezeletlen minta biogáz hozam értékeihez mért %-os eltérései.....	78. oldal



59. ábra A szennyvíziszap fermentlé minták egyes metánhozam értékei és a kezeletlen minta metánhozam értékeihez mért %-os eltérései.....	79. oldal
60. ábra A szennyvíziszap fermentlé biogáz hozamának időbeli kiértékelése.....	80. oldal
61. ábra A szennyvíziszap fermentlé metánhozamának időbeli kiértékelése.....	80. oldal
62. ábra A szennyvíziszap fermentlevek rothasztás előtti és utáni pH értékei.....	81. oldal
63. ábra A szennyvíziszap fermentlé utófermentációja során termelt biogáz %-os metán értéke.....	82. oldal
64. ábra Szennyvíziszap fermentlé kezelésének szemmel látható eredménye.....	82. oldal
65. ábra Folyadéknyírás és ütközés elvén történő kezelés biogáz hozamának vizsgált faktorai a szennyvíziszap fermentlé esetében.....	84. oldal
66. ábra A fordulatszám és a recirkuláció kölcsönhatása szennyvíziszap fermentlé esetében...	85. oldal
67. ábra Többletgáz ábrázolása a fordulatszám és a recirkuláció függvényében a szennyvíziszap fermentlé vizsgálata során.....	85. oldal
68. ábra Folyadéknyírás és ütközés elven történő kezelés metánhozamának vizsgált faktorai a szennyvíztelepi fermentlé esetében.....	86. oldal
69. ábra A szennyvíziszap fermentlé vizsgálata során kapott többlet metán ábrázolása a fordulatszám és a recirkuláció függvényében.....	86. oldal
70. ábra A mezőgazdasági fermentlé minták egyes biogáz hozam értékei és a kezeletlen minta biogáz hozam értékeihez mért %-os eltérései.....	87. oldal
71. ábra A mezőgazdasági fermentlé kezelések hatására elért metánhozam értékei és a kezeletlen minta metánhozam értékeihez mért %-os eltérései.....	88. oldal
72. ábra A mezőgazdasági fermentlé biogáz hozamának időbeli kiértékelése.....	89. oldal
73. ábra A mezőgazdasági fermentlé metánhozamának időbeli kiértékelése.....	89. oldal
74. ábra A mezőgazdasági fermentlevek rothasztás előtti és utáni pH értékei.....	90. oldal
75. ábra A mezőgazdasági fermentlé utófermentációja során termelt biogáz %-os metán értéke.....	91. oldal
76. ábra A mezőgazdasági fermentlé kezelésének szemmel látható eredménye.....	91. oldal
77. ábra Folyadéknyírás és ütközés elven történő kezelés biogáz hozamának vizsgált faktorai mezőgazdasági fermentlé esetében.....	93. oldal
78. ábra Többletgáz ábrázolása a fordulatszám és a recirkuláció függvényében mezőgazdasági fermentlé esetében.....	93. oldal
79. ábra Folyadéknyírás és ütközés elven történő kezelés metánhozamának vizsgált faktorai mezőgazdasági fermentlé esetében.....	94. oldal
80. ábra Fordulatszám és recirkuláció hatásábrája mezőgazdasági fermentlé esetében.....	95. oldal
81. ábra Többlet metán ábrázolása a fordulatszám és a recirkuláció függvényében mezőgazdasági fermentlé esetében.....	95. oldal

## **Köszönetek**

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Horváth Miklósnak sokéves szakmai támogatásáért és értekezésem elkészítésében nyújtott folyamatos és áldozatos segítségéért.

Köszönöm Dr. Horváth Sándor Dékán úrnak, Dr. Legeza Lászlónak és Dr. Horváth Miklósnak, hogy a kísérletek megvalósításához nélkülözhetetlen laboratóriumi eszközpark elérhetőségét számomra biztosította.

Köszönöm Dr. Németh Zsolt fizikusnak, hogy a Shark berendezés használatával kapcsolatos gyakorlati alkalmazást támogatta, segítette.

Köszönöm Bezsényi Anikónak a Dél-Pesti Szennyvíztisztító Telep kutatómunkatársának a segítő támogatását.

Köszönöm a Dél-Pesti Szennyvíztisztító Telep műszaki ellenőrzésért felelős osztály munkatársának, Tuba Lászlónak, hogy a kísérletekhez szükséges oltóiszapot biztosította.

Köszönöm munkatársaimnak, Szigeti Mártonnak, Misi Ádámnak és Kormos Klaudiának a kutatási kísérletek támogatását.

Kutatásaim egy része a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások „A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg”.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni Családomnak, akik végtelen türelemmel álltak mellettem, és támogattak mindenben, hogy ez az értekezés létrejöhessen.

## Száranyag-tartalom és szerves száranyag-tartalom mérési jegyzőkönyv

Adatlap száma / verzió száma:	<i>szat / v01</i>		
Mérést végezte:	<i>Bakosné Diószegi Mónika</i>		
Mérés dátuma:	<i>2014.04.08</i>		
Minta megnevezése:	<i>dömsödi fermentlé shark kezelésre</i>		
Minta leírása / megjegyzés:			
Szárítás / izzítás hőmérséklete (°C)	<i>105</i>	/	<i>600</i>
Szárítás / izzítás időtartama (óra)	<i>8</i>	/	<i>4</i>

Tégely száma	1	2	3
Tégely tömege üresen (g)	12,6940	14,7295	11,3611
Tégely tömege mintával (g)	15,8560	18,8364	14,9044
Szárítás utáni teljes tömeg (g)	12,8288	14,9023	11,5105
Izzítás utáni teljes tömeg (g)	12,7456	14,7982	11,4205
Bemért minta tömege (g)	3,1620	4,1069	3,5433
Szárítási maradék tömege (g)	0,1348	0,1728	0,1494
Izzítási maradék tömege (g)	0,0516	0,0687	0,0594
Száranyag-tartalom (%)	4,26	4,21	4,22
Izzítási veszteség (%)	38,28	39,76	39,76
Szerves száranyag-tartalom (%)	61,72	60,24	60,24
<b>Száranyag-tartalom (%)</b>	<b>4,23</b>	<b>±</b>	<b>0,03</b>
<b>Izzítási veszteség (%)</b>	<b>39,26</b>	<b>±</b>	<b>0,85</b>
<b>Szerves száranyag-tartalom (%)</b>	<b>60,74</b>	<b>±</b>	<b>0,85</b>

Felhasznált eszközök:	<i>Nabertherm LE 4/11/RP [SN 262711]</i>
	<i>Szilikagéllal töltött exikátor</i>
	<i>Sartorius AX 224 [28091469]</i>

<b>Fájlnev és elérési útvonal</b>
C:\Users\Diószegi Mónika\Documents\doktori\nagyvédés\védés_mellékletek\[20140408_dömsöd_iszapTSoTS.xlsx]szat

Mérést végezte:	Diószegi Mónika
Mérés időpontja:	2014. 4. 9. 15:00
Mérés leírása:	Shark04 - DOE 1. újbemérés ismétlés

### Mérési körülmények

#### **Alapanyagok**

Pozitív kontroll:	Molar Chemicals Microcrystallic cellulose Ph. Eur. 7.0. (2012.09/2017.08)
Minta:	Aprított búzaszalma szitálva (1-2mm frakció)
Oltóiszap:	Dömsödi mezőgazdasági fermentlé (fermentorból leeresztve: 2014.04.06)

#### **Batch rendszer**

Középső üveg töltete:	500 ml desztilláltvíz water
Tömítések vastagsága:	3 mm, szűrésre visszazáró szilikonlap (strenght: 20 )
Termosztát hőmérséklete (°C):	37

#### **Mérési paraméterek**

Tömegmérés:	Sartorius Industrial 6100 / 0,5 g
Gáz analízis:	DANI Master Fast Gaschromatography system
GC method:	csaFIDmethod

#### Batch rendszer



<b>Megjegyzések:</b>
A minták és a pozitív kontroll a szabvány alapján meghatározott mennyiségű oltóiszappal lett bemérve.
Az üvegek 400ml térfogatra lettek desztilláltvízzel egészítve.
A fermentációs üvegek gáztere nitrogénnel lett átöblítve.
2014.04.27.-én a napi biogáz gáztermelés az össztermelés 1% alatti értékét nem érte el, a kísérletet befejeződött.
<b>File name and path</b>
C:\Users\Diószegi Mónika\Documents\doktori\nagyvédés\védés_mellékletek\[jav.2.melléklet_ismShark04_újbemérés_1-22magyar.xlsx]DATA

**Kísérleti összeállítás VDI 4630-as szabvány alapján I.**

Megnevezés	Negatív kontrol	Pozitív kontrol	Minta 1/1	Minta 1/2.
Anyag	Nincs	Cellulose	Búzaszalma	Búzaszalma
Anyaggal kapcs. megjegyzés	-	-	1,25%_1600/minx 3x1ó	1,25%_1600/minx 3x1ó
Edényszám	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Ferm. elegy térf. (ml)</b>	400	400	400	400
Oltóiszap szat, TS (%)	4,23	4,23	4,23	4,23
Oltóiszap szerves szat., oTS (%)	60,74	60,74	60,74	60,74
Oltóiszap oTS reaktortérf. vetítve (%)	1,5	1,5	1,5	1,5
Szüks. oltóiszap összes oTS (g)	6,00	6,00	6,00	6,00
<b>Szükséges oltóiszap mennyisége (g)</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>
Szubsztrát szat, TS (%)	-	98,35	18,51	18,51
Szubsztrát szerves szat, oTS (%)	-	99,91	96,32	96,32
100 g szubsztrát szerves szat., oTS (g)	-	98,26	17,83	17,83
Szüks. szubsztrát összes oTS (g)	-	2,25	3,00	3,00
<b>Bemérendő szubsztrát tömege (g)</b>	-	<b>3,1</b>	<b>16,8</b>	<b>16,8</b>
Szubsztrát-oltóiszap oTS aránya	-	0,5	0,5	0,5
Fermentációs elegy szat (%)	-	3,10	3,25	3,25

Megnevezés	Minta 2/1.	Minta 2/2.	Minta 3/1.	Minta 3/2.
Anyag	Búzaszalma	Búzaszalma	Búzaszalma	Búzaszalma
Anyaggal kapcs. megjegyzés	2,5%_2900/minx3 x1ó	2,5%_2900/minx3 x1ó	2,5%_1600/minx9 x1ó	2,5%_1600/minx9 x1ó
Edényszám	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Ferm. elegy térf. (ml)</b>	400	400	400	400
Oltóiszap szat, TS (%)	4,23	4,23	4,23	4,23
Oltóiszap szerves szat., oTS (%)	60,74	60,74	60,74	60,74
Oltóiszap oTS reaktortérf. vetítve (%)	1,5	1,5	1,5	1,5
Szüks. oltóiszap összes oTS (g)	6,00	6,00	6,00	6,00
<b>Szükséges oltóiszap mennyisége (g)</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>
Szubsztrát szat, TS (%)	18,24	18,24	13,46	13,46
Szubsztrát szerves szat, oTS (%)	96,32	96,32	96,32	96,32
100 g szubsztrát szerves szat., oTS (g)	17,57	17,57	12,96	12,96
Szüks. szubsztrát összes oTS (g)	3,00	3,00	3,00	3,00
<b>Bemérendő szubsztrát tömege (g)</b>	<b>17,1</b>	<b>17,1</b>	<b>23,1</b>	<b>23,1</b>
Szubsztrát-oltóiszap oTS aránya	0,5	0,5	0,5	0,5
Fermentációs elegy szat (%)	3,25	3,25	3,25	3,25

**Kísérleti összeállítás VDI 4630-as szabvány alapján I.**

Megnevezés	Sample 4/1.	Sample 4/2.	Sample 5/1.	Sample 5/2.
Anyag	Búzaszalma	Búzaszalma	Búzaszalma	Búzaszalma
Anyaggal kapcs. megjegyzés	1,25%_2900/minx 9x16	1,25%_2900/minx 9x16	2,5%_1600/minx3 x156	2,5%_1600/minx3 x156
Edényszám	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Ferm. elegy térf. (ml)</b>	400	400	400	400
Oltóiszap szat, TS (%)	4,23	4,23	4,23	4,23
Oltóiszap szerves szat., oTS (%)	60,74	60,74	60,74	60,74
Oltóiszap oTS reaktortérf. vetítve (%)	1,5	1,5	1,5	1,5
Szüks. oltóiszap összes oTS (g)	6,00	6,00	6,00	6,00
<b>Szükséges oltóiszap mennyisége (g)</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>
Szubsztrát szat, TS (%)	11,20	11,20	17,05	17,05
Szubsztrát szerves szat, oTS (%)	96,32	96,32	96,32	96,32
100 g szubsztrát szerves szat., oTS (g)	10,79	10,79	16,42	16,42
Szüks. szubsztrát összes oTS (g)	3,00	3,00	3,00	3,00
<b>Bemérendő szubsztrát tömege (g)</b>	<b>27,8</b>	<b>27,8</b>	<b>18,3</b>	<b>18,3</b>
Szubsztrát-oltóiszap oTS aránya	0,5	0,5	0,5	0,5
Fermentációs elegy szat (%)	3,25	3,25	3,25	3,25

Megnevezés	Sample 6/1.	Sample 6/2.	Sample 7/1.	Sample 7/2.
Anyag	Búzaszalma	Búzaszalma	Búzaszalma	Búzaszalma
Anyaggal kapcs. megjegyzés	1,25%_2900/minx 3x156	1,25%_2900/minx 3x156	1,25%_1600/minx 9x156	1,25%_1600/minx 9x156
Edényszám	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
<b>Ferm. elegy térf. (ml)</b>	400	400	400	400
Oltóiszap szat, TS (%)	4,23	4,23	4,23	4,23
Oltóiszap szerves szat., oTS (%)	60,74	60,74	60,74	60,74
Oltóiszap oTS reaktortérf. vetítve (%)	1,5	1,5	1,5	1,5
Szüks. oltóiszap összes oTS (g)	6,00	6,00	6,00	6,00
<b>Szükséges oltóiszap mennyisége (g)</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>
Szubsztrát szat, TS (%)	15,24	15,24	11,61	11,61
Szubsztrát szerves szat, oTS (%)	95,91	95,91	95,99	95,99
100 g szubsztrát szerves szat., oTS (g)	14,62	14,62	11,61	11,61
Szüks. szubsztrát összes oTS (g)	3,00	3,00	3,00	3,00
<b>Bemérendő szubsztrát tömege (g)</b>	<b>20,5</b>	<b>20,5</b>	<b>25,8</b>	<b>25,8</b>
Szubsztrát-oltóiszap oTS aránya	0,5	0,5	0,5	0,5
Fermentációs elegy szat (%)	3,25	3,25	3,22	3,22

**Kísérleti összeállítás VDI 4630-as szabvány alapján I.**

Megnevezés	Minta 8/1.	Minta 8/2.	Centrumpont 1.	Centrumpont 2.
Anyag	Búzaszalma	Búzaszalma	Búzaszalma	Búzaszalma
Anyaggal kapcs. megjegyzés	2,5%_2900/minx9 x15ó	2,5%_2900/minx9 x15ó	1,875%_2250/min x6x8ó	1,875%_2250/min x6x8ó
Edényszám	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
<b>Ferm. elegy térf. (ml)</b>	400	400	400	400
Oltóiszap szat, TS (%)	4,23	4,23	4,23	4,23
Oltóiszap szerves szat., oTS (%)	60,74	60,74	60,74	60,74
Oltóiszap oTS reaktortérf. vetítve (%)	1,5	1,5	1,5	1,5
Szüks. oltóiszap összes oTS (g)	6,00	6,00	6,00	6,00
<b>Szükséges oltóiszap mennyisége (g)</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>
Szubsztrát szat, TS (%)	12,41	12,41	12,00	12,00
Szubsztrát szerves szat, oTS (%)	97,10	97,10	96,00	96,00
100 g szubsztrát szerves szat., oTS (g)	12,05	12,05	11,52	11,52
Szüks. szubsztrát összes oTS (g)	3,00	3,00	3,00	3,00
<b>Bemérendő szubsztrát tömege (g)</b>	<b>24,9</b>	<b>24,9</b>	<b>26,0</b>	<b>26,0</b>
Szubsztrát-oltóiszap oTS aránya	0,5	0,5	0,5	0,5
Fermentációs elegy szat (%)	3,24	3,24	3,25	3,25

Megnevezés	Kezeletlen minta	Kezeletlen minta
Anyag	Búzaszalma	Búzaszalma
Anyaggal kapcs. megjegyzés	Kezeletlen	Kezeletlen
Edényszám	<b>21</b>	<b>22</b>
<b>Ferm. elegy térf. (ml)</b>	400	400
Oltóiszap szat, TS (%)	4,23	4,23
Oltóiszap szerves szat., oTS (%)	60,74	60,74
Oltóiszap oTS reaktortérf. vetítve (%)	1,5	1,5
Szüks. oltóiszap összes oTS (g)	6,00	6,00
<b>Szükséges oltóiszap mennyisége (g)</b>	<b>233,5</b>	<b>233,5</b>
Szubsztrát szat, TS (%)	93,41	93,41
Szubsztrát szerves szat, oTS (%)	96,32	96,32
100 g szubsztrát szerves szat., oTS (g)	89,97	89,97
Szüks. szubsztrát összes oTS (g)	3,00	3,00
<b>Bemérendő szubsztrát tömege (g)</b>	<b>3,3</b>	<b>3,3</b>
Szubsztrát-oltóiszap oTS aránya	0,5	0,5
Fermentációs elegy szat (%)	3,25	3,25

**Harmadik edény tömegei**

Üveg sorszáma	Tömeg (g)	Üveg sorszáma	Tömeg (g)
1	334,5	12	335,5
2	335,5	13	335,0
3	335,0	14	335,5
4	334,5	15	335,5
5	335,0	16	335,0
6	334,5	17	335,5
7	334,5	18	335,5
8	334,5	19	335
9	335,0	20	338
10	334,5	21	339
11	337,5	22	335,5

**Légnomás és pH adatok**

Dátum	Légnomás (mbar)	Edényszám	pH (1)
2014.04.10 10:30	1017,9	1.	7,61
2014.04.11 10:30	1019	2.	7,52
2014.04.12 10:30	1019	3.	7,43
2014.04.14 10:30	1013,4	4.	7,42
2014.04.16 10:30	1018	5.	7,34
2014.04.18 10:30	1010	6.	7,36
2014.04.23 10:30	1016,8	7.	7,33
2014.04.25 10:30	1012,2	8.	7,30
2014.04.27 10:30	1012,2	9.	7,31
		10.	7,32
		11.	7,31
		12.	7,37
		13.	7,31
		14.	7,31
		15.	7,28
		16.	7,30
		17.	7,31
		18.	7,33
		19.	7,31
		20.	7,40
		21.	7,31
		22.	7,31



**Térfogatmérések eredményei**

Dátum	Teljes harmadik edény tömege (g)										
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
2014.04.10 10:30	443,0	469,0	496,0	499,0	501,0	507,0	512,0	533,5	506,5	517,0	545,0
2014.04.11 10:30	382,0	782,0	476,0	468,0	494,0	466,0	501,0	537,0	510,0	509,0	488,0
2014.04.12 10:30	379,0	777,0	440,0	439,0	470,0	450,0	461,0	491,0	472,0	463,0	460,0
2014.04.14 10:30	374,0	578,0	462,0	467,0	508,0	473,0	513,0	588,0	532,0	531,0	518,0
2014.04.16 10:30	360,0	372,0	470,0	460,0	484,0	453,0	500,0	569,0	494,0	501,0	492,0
2014.04.18 10:30	354,0	365,0	435,0	429,0	452,0	443,0	455,0	514,0	447,0	443,0	453,0
2014.04.23 10:30	361,0	348,0	475,0	470,0	470,0	430,0	435,0	524,0	442,0	408,0	450,0
2014.04.25 10:30	337,0	335,5	340,0	340,0	347,0	342,0	343,0	358,0	342,0	348,0	353,0
2014.04.27 10:30	334,5	335,5	335,0	334,5	335,0	334,5	334,5	335,0	335,0	334,5	337,5

**Kiértékelés- termelt gáz mennyisége**

Dátum	Termelt mennyiség (ml)										
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
2014. 4. 10. 10:30	108,5	133,5	161,0	164,5	166,0	172,5	177,5	199,0	171,5	182,5	207,5
2014. 4. 11. 10:30	47,5	446,5	141,0	133,5	159,0	131,5	166,5	202,5	175,0	174,5	150,5
2014. 4. 12. 10:30	44,5	441,5	105,0	104,5	135,0	115,5	126,5	156,5	137,0	128,5	122,5
2014. 4. 14. 10:30	39,5	242,5	127,0	132,5	173,0	138,5	178,5	253,5	197,0	196,5	180,5
2014. 4. 16. 10:30	25,5	36,5	135,0	125,5	149,0	118,5	165,5	234,5	159,0	166,5	154,5
2014. 4. 18. 10:30	19,5	29,5	100,0	94,5	117,0	108,5	120,5	179,5	112,0	108,5	115,5
2014. 4. 23. 10:30	26,5	12,5	140,0	135,5	135,0	95,5	100,5	189,5	107,0	73,5	112,5
2014. 4. 25. 10:30	2,5	0,0	5,0	5,5	12,0	7,5	8,5	23,5	7,0	13,5	15,5
2014. 4. 27. 10:30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0



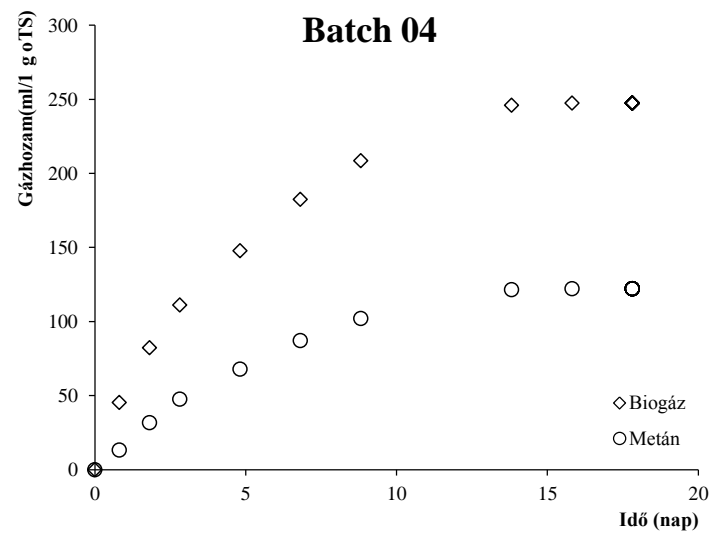
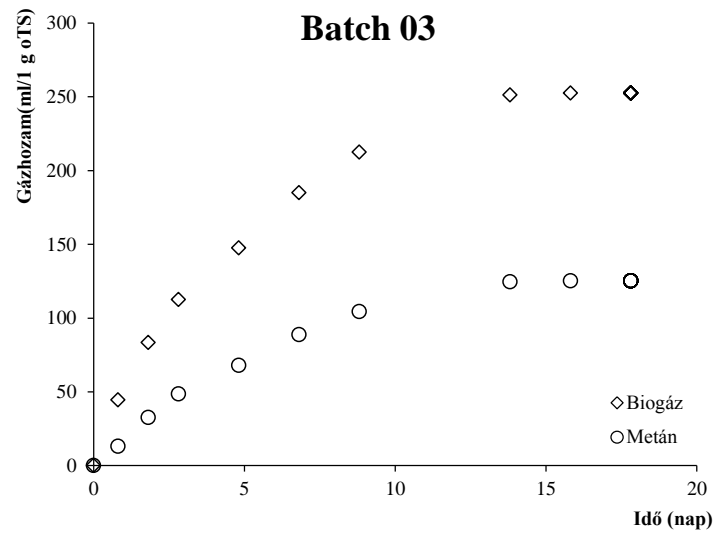
**Kiértékelés - metánkoncentráció (%)**

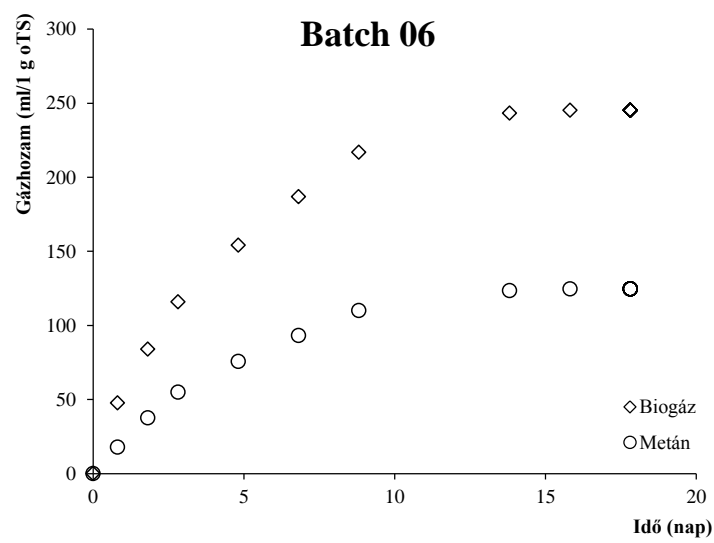
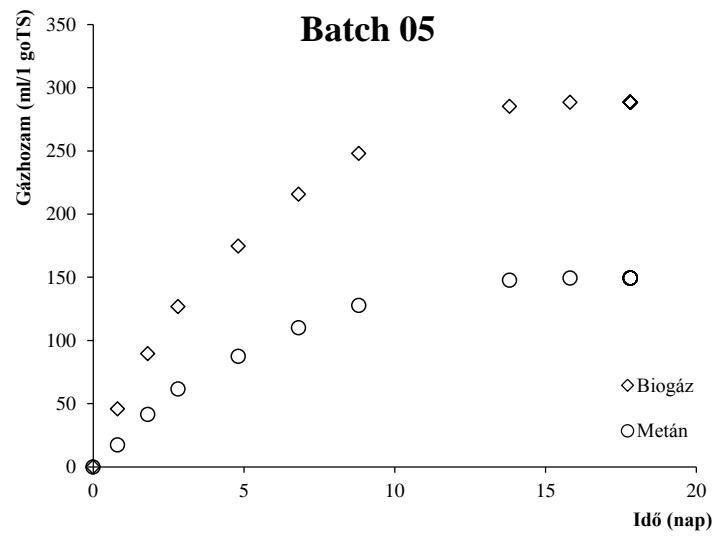
Dátum	Metán koncentráció (%)										
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
2014. 4. 10. 10:30	12,6	22,9	29,3	29,3	38,0	37,4	36,7	39,9	31,5	33,6	38,3
2014. 4. 11. 10:30	23,9	43,6	50,2	50,2	55,0	54,4	56,6	56,6	55,0	55,4	51,5
2014. 4. 12. 10:30	38,0	60,6	55,0	55,0	54,0	54,4	55,7	53,0	54,6	54,5	56,2
2014. 4. 14. 10:30	38,0	60,6	55,0	55,0	54,0	54,4	55,7	53,0	54,6	54,5	56,2
2014. 4. 16. 10:30	41,0	60,0	56,0	56,0	55,0	53,5	53,7	52,8	53,2	53,3	56,1
2014. 4. 18. 10:30	39,8	58,6	56,6	56,6	55,0	56,0	56,5	59,0	59,0	57,0	56,4
2014. 4. 23. 10:30	31,0	44,6	52,0	52,0	53,5	51,0	56,5	56,1	55,1	54,4	53,8
2014. 4. 25. 10:30	31,0	40,1	51,0	51,0	51,2	52,9	53,0	56,3	50,8	51,5	50,6
2014. 4. 27. 10:30	30,0	40,0	49,0	48,0	48,0	50,0	53,0	56,0	51,0	49,0	50,0

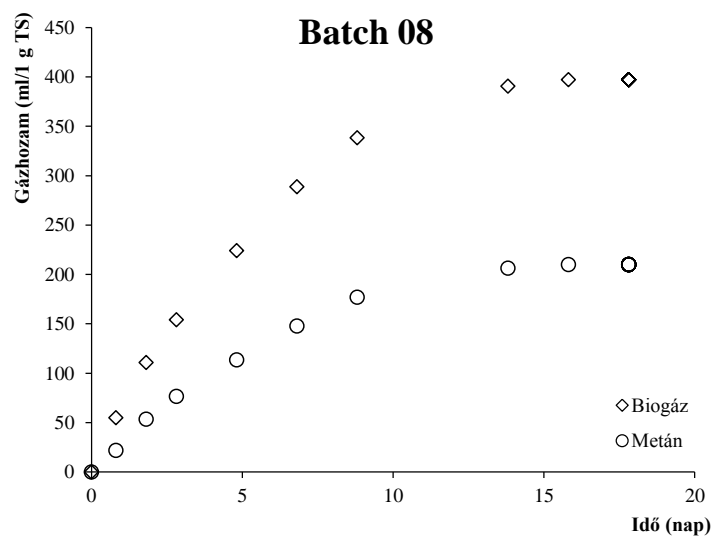
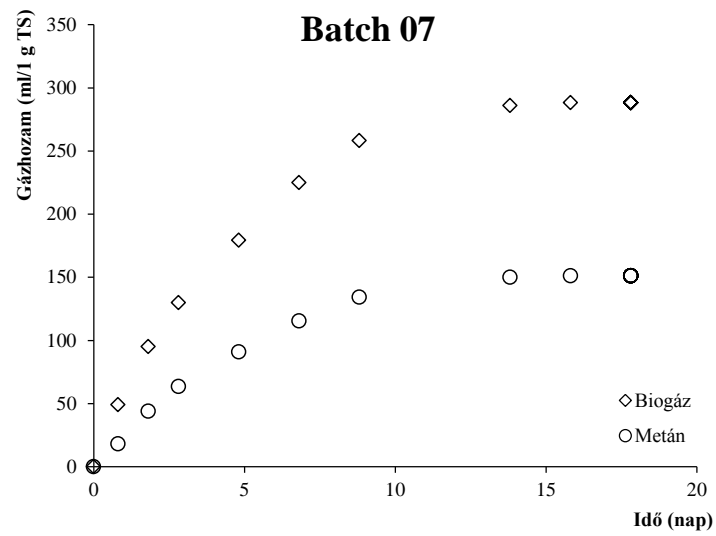
**Kiértékelés - metánkoncentráció (%)**

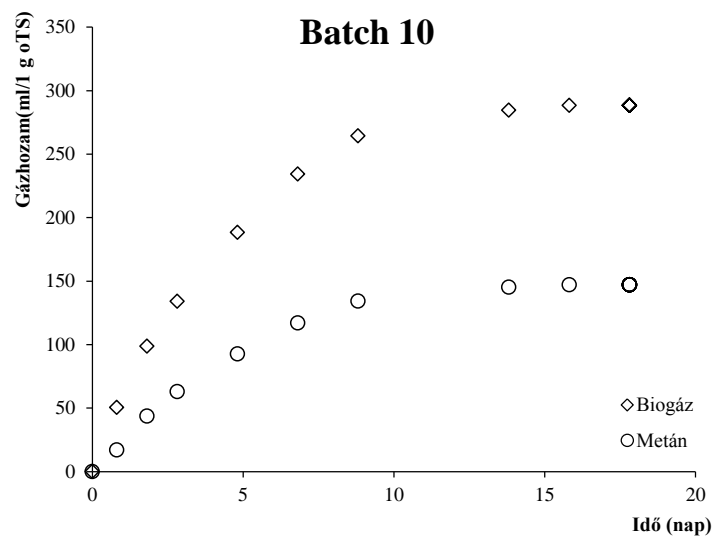
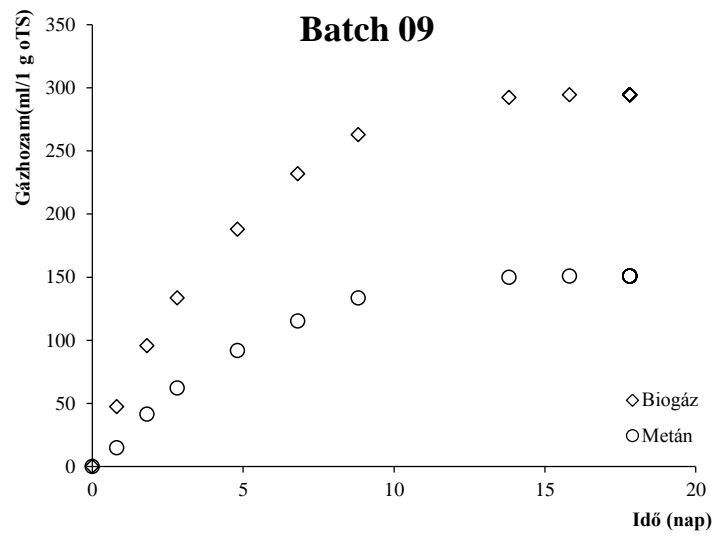
Dátum	Metán koncentráció (%)										
	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.
2014. 4. 10. 10:30	38,3	32,6	36,5	39,4	37,3	44,9	44	44,4	40,5	28,1	28,4
2014. 4. 11. 10:30	52,6	55,3	55,5	55,3	56,5	59,6	50,2	56,5	58,8	44,9	42,6
2014. 4. 12. 10:30	56,3	55,2	60,0	55,8	55,3	56,6	57	57	57,7	56,1	57,3
2014. 4. 14. 10:30	56,3	55,2	60,0	55,8	55,3	56,6	57	57	57,7	56,1	57,3
2014. 4. 16. 10:30	54,3	58,0	56,0	57,2	56,7	55,1	57,4	53,5	56	52,8	52,2
2014. 4. 18. 10:30	57,2	58,5	58,0	58,3	58,4	54,8	59,3	58,7	59,5	56,4	56
2014. 4. 23. 10:30	51,3	62,2	60,9	61,53	61,6	60,2	59	64	58,5	50	50
2014. 4. 25. 10:30	51,0	63,0	65,8	65,8	62	61	64,4	65,4	62,3	50	50
2014. 4. 27. 10:30	51,0	60,0	59,0	61,4	59,5	57,4	58,6	58,9	56,9	48	47,6

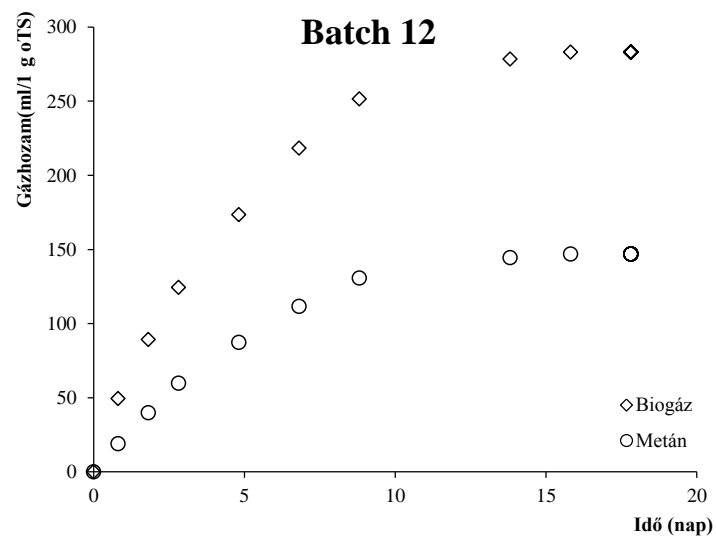
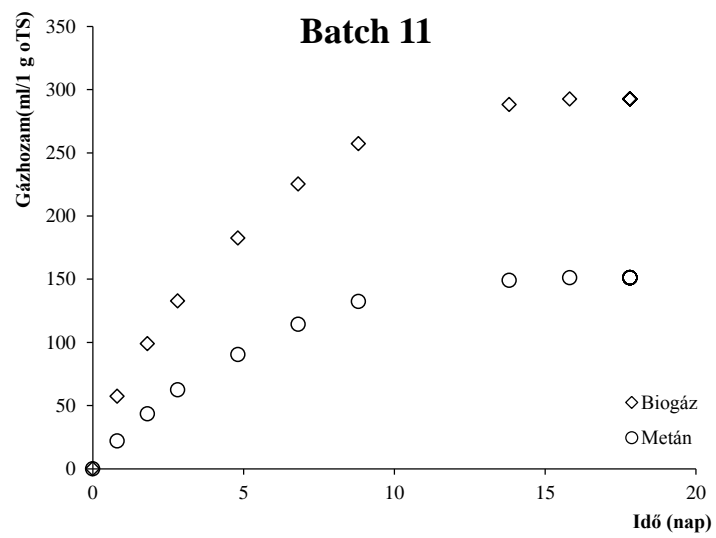
Ábrák I.



**Ábrák II.**

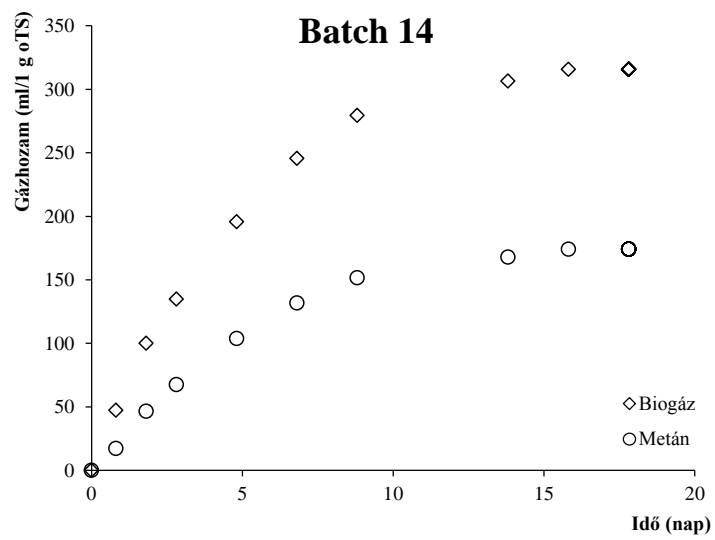
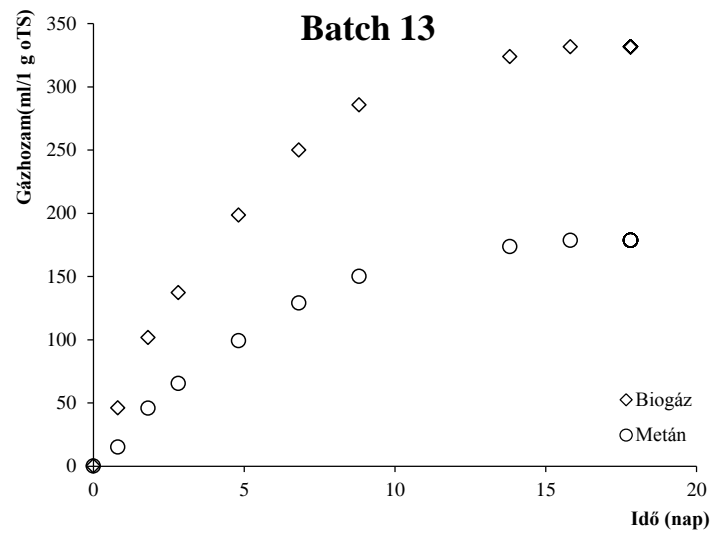
**Ábrák III.**

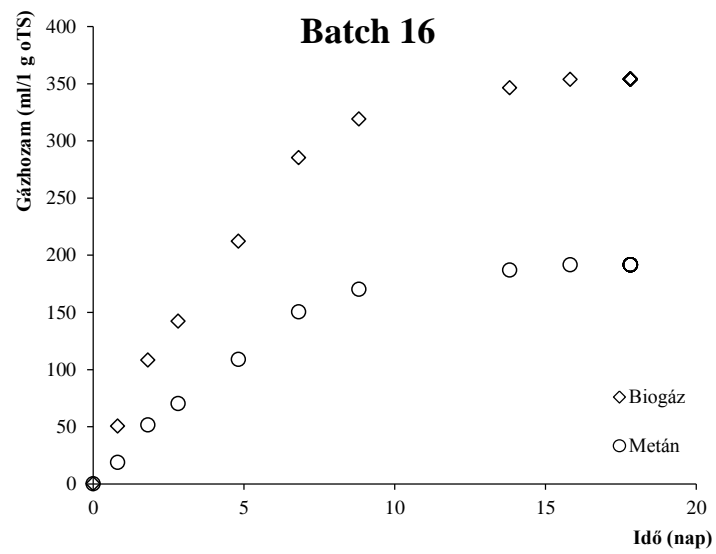
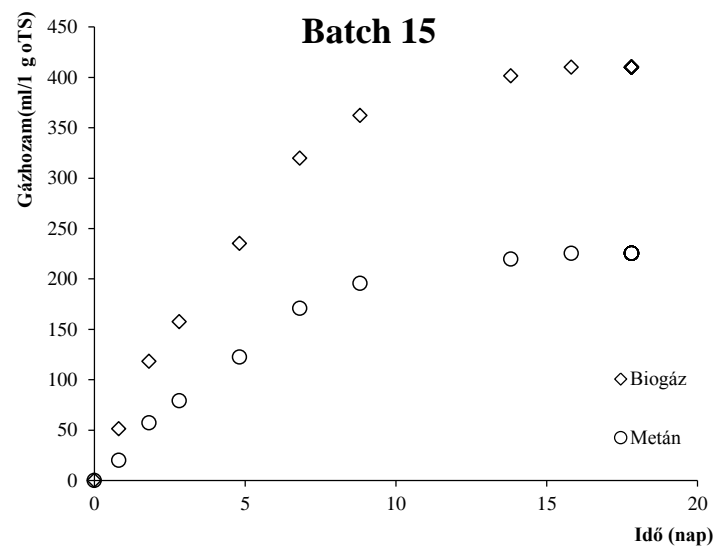
Ábrák IV.

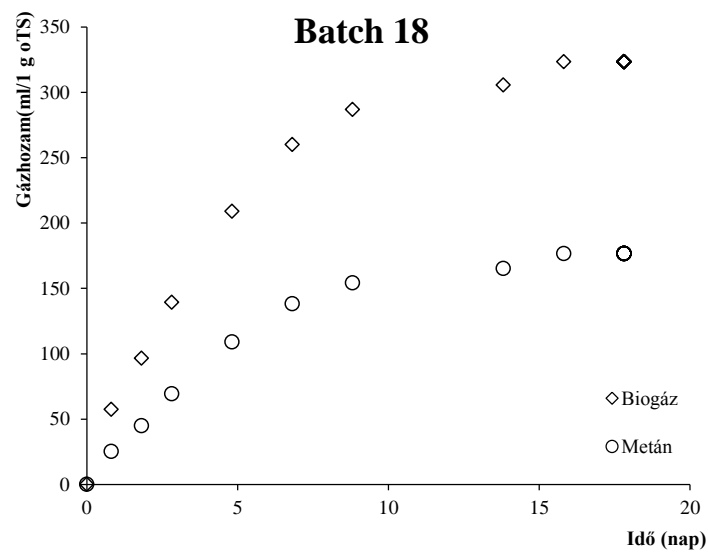
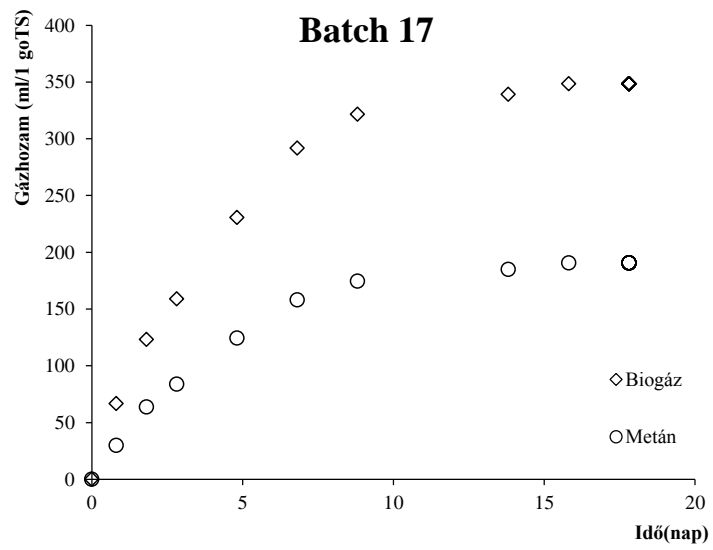
Ábrák V.

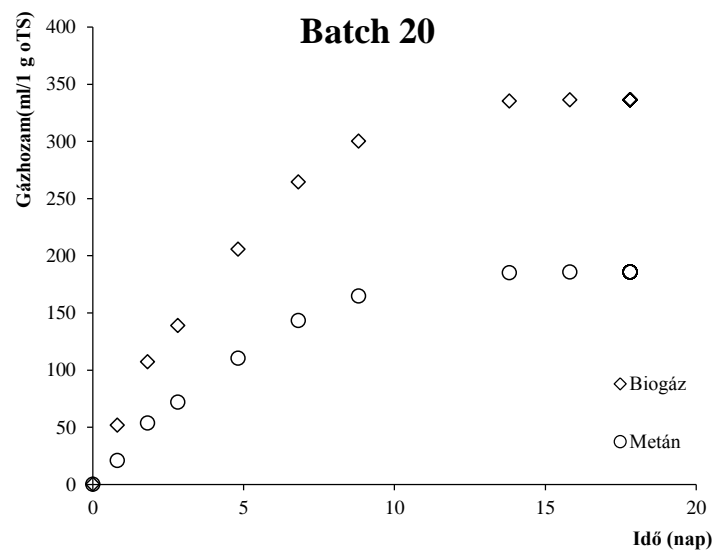
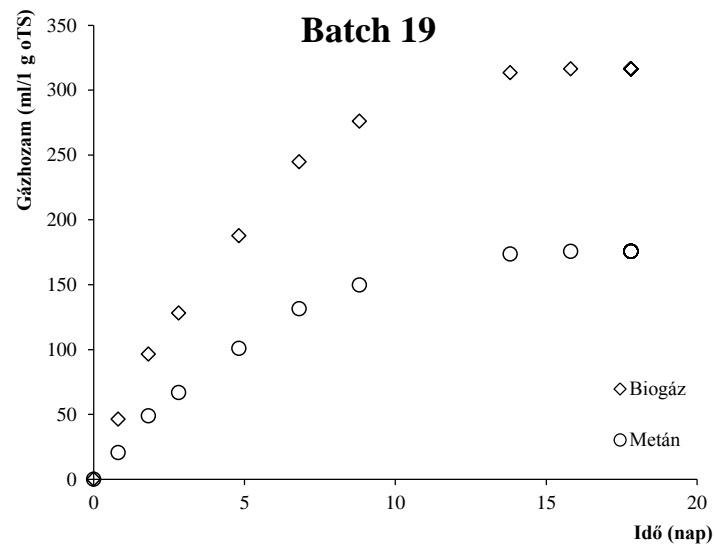


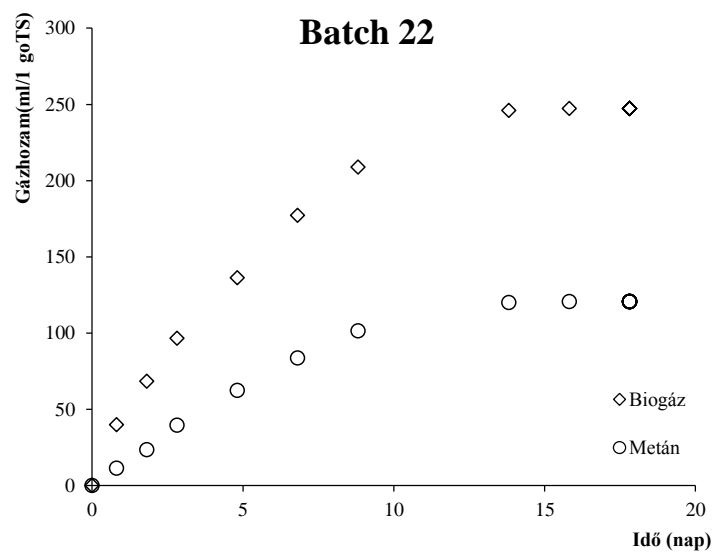
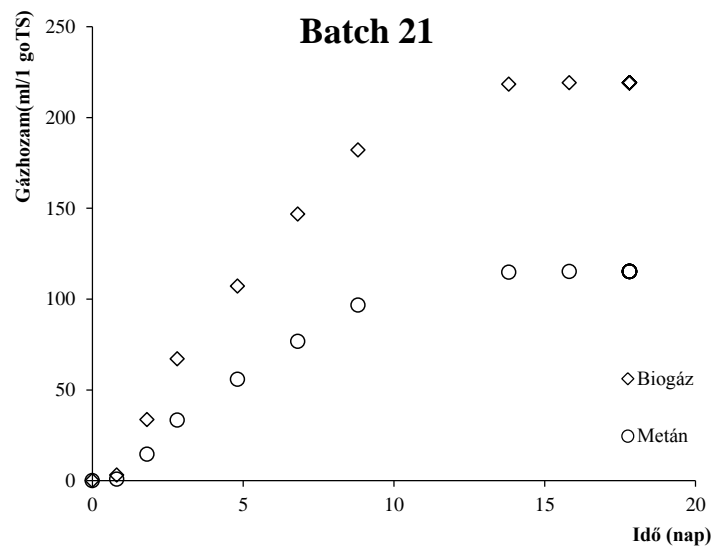
Ábrák VI.



**Abrák VII.**

**Ábrák VIII.**

Ábrák IX.

Ábrák X.



A búzaszalma szubsztrátum Shark berendezéssel történő előkezelés optimalizálásának statisztikai (ANOVA) eredményei:

#### Az összes vizsgált faktor hatása a 16. napon a gázhozam többlet alapján

Estimated Effects and Coefficients for gáz_16_többlet (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		58,54	9,478	6,18	0,000
Block		13,05	10,945	1,19	0,267
Fordulatszám	-7,33	-3,66	7,739	-0,47	0,649
<b>Recirkuláció</b>	<b>52,03</b>	<b>26,01</b>	<b>7,739</b>	<b>3,36</b>	<b>0,010</b>
<b>Áztatási idő</b>	<b>53,77</b>	<b>26,89</b>	<b>9,478</b>	<b>2,84</b>	<b>0,022</b>
Szár.a.t.	0,43	0,21	7,739	0,03	0,979
Fordulatszám*Recirkuláció	-33,73	-16,86	7,739	-2,18	0,061
Fordulatszám*Áztatási idő	9,98	4,99	7,739	0,64	0,537
Fordulatszám*Szár.a.t.	-6,53	-3,26	7,739	-0,42	0,684
Ct Pt		37,86	28,435	1,33	0,220

**S = 30,9561** PRESS = \*  
**R-Sq = 76,35%** R-Sq(pred) = \*% R-Sq(adj) = 49,75%

#### A fermentációt befolyásoló faktorok hatásának értéke a 16. napon a gázhozam többlet alapján

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		67,09	7,31	9,18	0,000	
Fordulatszám	-7,33	-3,66	7,76	-0,47	0,647	1,00
Recirkuláció	52,03	26,01	7,76	3,35	0,007	1,00
Áztatási idő	40,73	20,36	7,76	2,63	0,025	1,00
Szár.a.t.	0,42	0,21	7,76	0,03	0,979	1,00
Fordulatszám*Recirkuláció	-33,73	-16,86	7,76	-2,17	0,055	1,00
Fordulatszám*Áztatási idő	9,97	4,99	7,76	0,64	0,535	1,00
Fordulatszám*Szár.a.t.	-6,53	-3,26	7,76	-0,42	0,683	1,00

#### Az összes vizsgált faktor hatása a 16. napon a metánhozam többlet alapján

Estimated Effects and Coefficients for CH4_16_többlet (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		40,42	5,265	7,68	0,000
Block		6,95	6,080	1,14	0,286
Fordulatszám	-1,84	-0,92	4,299	-0,21	0,836
<b>Recirkuláció</b>	<b>31,79</b>	<b>15,89</b>	<b>4,299</b>	<b>3,70</b>	<b>0,006</b>
<b>Áztatási idő</b>	<b>36,66</b>	<b>18,33</b>	<b>5,265</b>	<b>3,48</b>	<b>0,008</b>
Szár.a.t.	0,34	0,17	4,299	0,04	0,970
<b>Fordulatszám*Recirkuláció</b>	<b>-22,14</b>	<b>-11,07</b>	<b>4,299</b>	<b>-2,57</b>	<b>0,033</b>
Fordulatszám*Áztatási idő	7,39	3,69	4,299	0,86	0,415
Fordulatszám*Szár.a.t.	-2,64	-1,32	4,299	-0,31	0,767
Ct Pt		28,73	15,796	1,82	0,106

**S = 17,1964** PRESS = \*  
**R-Sq = 82,00%** R-Sq(pred) = \*% R-Sq(adj) = 61,75%

#### A fermentációt befolyásoló faktorok hatásának értéke a 16. napon a metánhozam többlet alapján

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		45,93	4,31	10,65	0,000	
Fordulatszám	-1,84	-0,92	4,57	-0,20	0,845	1,00
Recirkuláció	31,79	15,89	4,57	3,47	0,006	1,00
Áztatási idő	29,71	14,86	4,57	3,25	0,009	1,00
Szár.a.t.	0,34	0,17	4,57	0,04	0,971	1,00
Fordulatszám*Recirkuláció	-22,14	-11,07	4,57	-2,42	0,036	1,00
Fordulatszám*Áztatási idő	7,39	3,69	4,57	0,81	0,438	1,00
Fordulatszám*Szár.a.t.	-2,64	-1,32	4,57	-0,29	0,779	1,00

A szennyvíz iszap fermentlé Shark berendezéssel történő előkezelés vizsgálatának statisztikai (ANOVA) eredményei:

Az összes vizsgált faktor hatása a 9. napon a gázhozam többlet alapján

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		26,452	0,476	55,57	0,000	
ford.sz.	1,056	0,528	0,476	1,11	0,318	1,00
rec	2,806	1,403	0,476	2,95	0,032	1,00
ford.sz.*rec	3,856	1,928	0,476	4,05	0,010	1,00
Ct Pt		-5,10	1,06	-4,79	0,005	1,00

Az összes vizsgált faktor hatása a 9. napon a metánhozam többlet alapján

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		30,844	0,441	69,98	0,000	
ford.sz.	2,158	1,079	0,441	2,45	0,058	1,00
rec	4,558	2,279	0,441	5,17	0,004	1,00
ford.sz.*rec	0,958	0,479	0,441	1,09	0,327	1,00
Ct Pt		-2,379	0,986	-2,41	0,061	1,00



A mezőgazdasági fermentlé Shark berendezéssel történő előkezelés vizsgálatának statisztikai (ANOVA) eredményei:

Az összes vizsgált faktor hatása a 8. napon a gázhozam többlet alapján

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		11,199	0,869	12,89	0,000	
ford.sz.	-0,169	-0,084	0,869	-0,10	0,926	1,00
rec	-7,661	-3,831	0,869	-4,41	0,007	1,00
ford.sz.*rec	-1,727	-0,864	0,869	-0,99	0,366	1,00
Ct Pt		-0,55	1,94	-0,28	0,790	1,00

Az összes vizsgált faktor hatása a 8. napon a metánhozam többlet alapján

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		10,238	0,296	34,64	0,000	
ford.sz.	1,451	0,725	0,296	2,45	0,058	1,00
rec	-2,565	-1,283	0,296	-4,34	0,007	1,00
ford.sz.*rec	-0,002	-0,001	0,296	-0,00	0,997	1,00
Ct Pt		-0,125	0,661	-0,19	0,857	1,00