

Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Gépszerkezettani és Biztonságtechnikai Intézet



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Kavitációs előkezelés hatása biomassa fermentációra

Szerző(k): **Farkas Rita**
vegyipari energetikai mérnök BSc. szak,
IV. évf.

Konzulens(ek): **Dr. Horváth Miklós**
egy. adjunktus
Poós Tibor
egy. tanársegéd

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Szakirodalmi áttekintés.....	4
2.1. A biogáz	4
2.2. A biogáz keletkezése.....	4
2.3. Biogáz gyártási módok.....	5
2.3.1. Alapanyag szerinti csoportosítás.....	5
2.3.2. Betáplálás szerinti csoportosítás	6
2.4. Biogáz gyártás alapanyagai.....	8
2.4.1. Az alapanyagok fajtái.....	9
2.4.2. Az alapanyagok jellemzői	11
2.5. Szerves alapanyagok előkészítési műveletei.....	13
2.5.1. Fizikai.....	14
2.5.1.1. Termikus	14
2.5.1.2. Mechanikus	15
2.5.3. Kémiai.....	16
2.5.4. Biológiai.....	18
2.5.5. Kombinált.....	20
2.6. A kavitáció elméleti háttere	20
2.6.1. A hidrodinamikus kavitáció ismertetése	21
2.6.2. Az ultrahangos kavitáció ismertetése.....	22
2.7. Koncentráció és abszorbancia viszonya.....	23
3. Anyag és módszer.....	24
3.1. Ultrahangos, rezgő rudas kavitációs berendezés.....	24
3.2. Ultrahangos kavitációs kád	25
3.3. Hidrodinamikus kavitációs berendezés.....	26
3.4. Kálium-jodidos kísérlet.....	28
3.5. Kémiai oxigénigény mérése	29
3.6. A termelt gáz és metán mérése.....	31

4. Eredmények	34
4.1. Ultrahangos, rezgő rudas kavitáció	34
4.2. Ultrahangos kavitációs kád	35
4.3. Kálium-jodidos kísérlet.....	36
4.4. Kémiai oxigénigény számítása.....	38
4.5. Batch mérés	41
5. Összefoglalás	51
6. Irodalomjegyzék	53

1. BEVEZETÉS

Az Európai Tanács 2008 decemberében elfogadta az Energia- és klímacsomagot, amely szerint 2020-ra az 1990-ben kibocsátott üvegházhatású gázok környezetbe kerülését legalább 20%-al kell csökkenteni. Tartalmazza továbbá, hogy az összes energiafogyasztáson belül legalább 20%-ot kell kitennie a megújulók részarányának, illetve az üzemanyagok legalább 10%-át megújuló energiaforrásból kell biztosítani [1].

A biogáz olyan megújuló energia, amely keletkezés közben csökkenti az üvegházhatású gázok mennyiségét. Biogázból nem csak hő- és villamos energia állítható elő, hanem üzemanyag is. A biogáz termelés másik fontos szerepe a hulladékkezelés területén van. Biogázt nem csak növényekből, hanem különböző háztartási hulladékokból, illetve mezőgazdasági melléktermékekből is előállíthatunk. Az előállítás melléktermékét növények trágyázására lehet használni. A biomasszából fermentáció során előállított energiának egyetlen hátránya a relatív magas előállítási költség, de az előbb említett előnyök miatt több ország támogatja más energiaforrásokkal szemben. Az előállítás gazdaságosabbá tételéhez növelni kell az azonos idő alatt előállított mennyiséget és javítani annak minőségét. Erre a feladatra különféle alapanyag előkezelési eljárások léteznek. Dolgozatom fő témája ezen előkezelések ismertetése, bemutatása. Az egyik legjelentősebb előkészítési módszer az aprítás. Erre nem csupán azért van szükség, hogy egy fermentorba megfelelő méretű és állagú anyagot lehessen betáplálni a szemcsék lapátokon történő elakadásának elkerülése végett, hanem felületnövelő szerepe is van. Az erjesztő baktériumok így hatékonyabb lebontásra képesek.

Munkám során a kavitáció pozitív hatását alkalmazó berendezéseket vizsgálom. Méréseket végzek ultrahangos és hidrodinamikus kavitációs berendezéssel, valamint összehasonlítom a készülékek hatásfokát. Ezután kísérletek segítségével igazolom az előkezelési műveletek létjogosultságát. Szakaszos eljárással állítok elő biogázt előkezelés nélküli, illetve előkezelt alapanyagból. A keletkező gázok mennyiségéből és metántartalmából következtetést vonok le az előkezelés hasznosságát illetően.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. *A biogáz*

A biogáz szerves anyagok anaerob (oxigénmentes körülmények között lejátszódó) erjedése során, mikrobák együttműködésével keletkező légnemű anyag. 50-70%-ban éghető metánt, 28-48%-ban égésre képtelen széndioxidot tartalmaz. A maradék 1-2%-ot vízgőz, kénhidrogén, nitrogén és egyéb gázok alkotják. A metán részarányától függően a biogáz fűtőértéke 18-25 MJ/Nm³. Ezt az értéket sűrítéssel és tisztítással tovább növelhetjük [2].

Biogáz keletkezésére több példa található a természetben, ilyen a mocsárgáz, rizsföldeken keletkező biogáz, hulladéklerakó telepeken képződő depóniagáz, szennyvíziszap rothasztóban, illetve kérődző állatok, természetek, bálnák emésztőrendszerében keletkező biogáz. Az iparban is ezeket a folyamatokat veszik alapul, majd mesterséges beavatkozással növelik a gázképződés hatásfokát [3].

2.2. *A biogáz keletkezése*

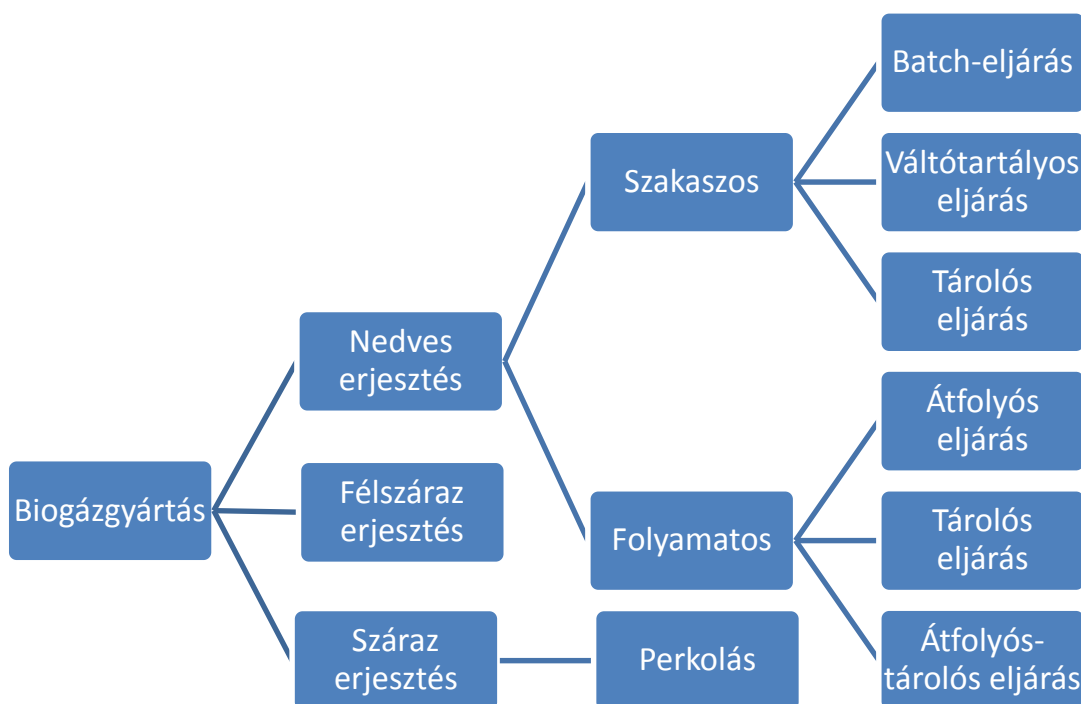
A szerves anyagok lebontását három baktériumcsoport végzi: hidrolizáló mikroorganizmusok, acetogén mikroorganizmusok és metanogén mikroorganizmusok. Az első lépésben a hidrolizáló baktériumok a polimer molekulákat kisebb, már emészthető anyagokká bontják. Mivel a polimer láncok túl nagyok, ezért a baktériumok nem tudják őket bekebelezni, hanem exoenzimeiket kiküldik magukból, és sejten kívül darabolják fel őket és az így keletkező kisebb molekulákat már meg tudják emészteni. Anyagcsere folyamatuk melléktermékei az illó szerves savak. Ezeket a savakat az acetogén baktériumok dolgozzák fel és hidrogénné alakítják. Az így keletkező hidrogénből a metanogén mikroorganizmusok termelik a metánt, ami a biogáz fő összetevője. Tehát a metanogének működése az acetogénektől függ, mivel ők állítják elő számukra a tápanyagot. Ez a függés azonban kölcsönös, mivel ha a metanogének nem használják fel a hidrogént, annak felhalmozódása csökkenti az acetogének működését.

A biogáz gyártás legkritikusabb része a baktériumok számára megfelelő környezet létrehozása. Több kísérletet is végeztek a különböző baktériumok tenyésztésére, és biogáz

üzembe illesztésére, de a gyakorlat azt mutatja, hogy a helyben kialakuló mikroorganizmusok működése a leghatékonyabb [2].

2.3. Biogáz gyártási módok

Az egyes eljárások hasonló elveket alkalmaznak, különbséget csak a felhasznált alapanyag fajtája és a betáplálás módja jelent, valamint elkülöníthetünk egy- vagy többlépcsős folyamatokat [2, 3].



1. ábra Biogáz gyártási módok [3]

2.3.1. ALAPANYAG SZERINTI CSOPORTOSÍTÁS

Az alapanyag szárazanyagtartalma szerint száraz, félszáraz, illetve nedves erjesztést különíthetünk el [2].

Száras erjesztésnél az anyag szárazanyagtartalma 30% fölött van. Az alapanyag szilárd, vagy aprítatlan trágya, melynek szállítása és adagolása nehézkes. Svájcban és Németországban kísérleteznek ezzel a módszerrel, de az iparban ez az eljárás még nem terjedt el.

Félszáraz erjesztésre a 15-30% szárazanyag tartalom a jellemző. A felhasználásra kerülő biomassza összetétele változatos: szennyvíziszap, kommunális hulladék, mezőgazdasági hulladék. A szárazanyag tartalom növelése érdekében, meghatározott recept alapján aprított szalmát kevernek hozzá.

Nedves erjesztésről beszélünk, ha a szárazanyag tartalom 15% alatt van. Ilyenkor a hígtrágyát, illetve az élelmiszeriparból kikerülő szerves anyagot tartalmazó folyékony anyagokat használják fel. Az erjesztés közben keletkező folyékony biotrágya felhasználása azonban egyes helyeken még problémát jelent.

2.3.2. BETÁPLÁLÁS SZERINTI CSOPORTOSÍTÁS

A nedves eljárást tovább csoportosíthatjuk folyamatos, illetve szakaszos betáplálású eljárásokra [3].

Folyamatos eljárásnál az alapanyagot folyamatosan vezetik be az erjesztőbe és folyamatosan távolítják el onnan. Mivel az erjesztőben lévő alapanyag összetétele viszonylag állandó, ezért egyenletes biogázhozamot kapunk. További előnye, hogy könnyen automatizálható, viszont a kiejert biotrágya szeparálást és nagyobb tárolóteret igényel.

Szakaszos eljárásnál nagyobb szárazanyag tartalmú alapanyagokat használnak, így nagyobb biogázhozam nyerhető ki kevesebb biomasszából. Mivel a betáplálás szakaszos, azaz csak akkor adagolunk be újabb anyagokat, mikor az előző adag erjedése befejeződött és távozott a fermentorból, ezért a gázkihozatal nem egyenletes. Ennek javítása érdekében növelik az érlelési időt, de ez csökkenti a biogáz termelés hatékonyságát.

A szakaszos eljárásokat tovább lehet bontani batch, váltótartályos és tárolós eljárásokra.

Batch-eljárás

A batch eljárás szakaszos műveletet jelent. Ipari méretekben az eljáráshoz 3 azonos méretű tartály szükséges: egy előtartály, maga a batch-tartály és egy tároló tartály. A rothasztásra szánt anyagot egyszerre kell betölteni a batch-tartályba, majd várni míg a gáz-

termelés beindul. A tartály ürítése is egy lépésben történik, azonban 5-10 % körüli rothasztott iszapot a tartályban hagynak, hogy segítsen beindítani a következő beadagolt alapanyag rothasztását. A folyamat hátránya a lassúsága, mert a hosszú várakozási idő alatt beinduló bomlási folyamatok nitrogén,- és metánvesztéseget eredményeznek. A magas költségek miatt főleg laborokban használják, mert a friss és kezelt alapanyag nem keveredik.

Váltótartályos eljárás

Az eljáráshoz négy tartály szükséges, ezért magas a beruházási költsége. Az előgödörben az alapanyag 1-2 napig áll, majd egyenletesen kerül a rothasztótartályba. Ha már kiejedt az iszap, akkor a tárolótartályba, egy nagyobb térfogatú tartályba kerül. Az eljárás azért váltótartályos, mert két darab rothasztótartály működik párhuzamosan. Amíg az egyik tartályban az erjesztés folyik, addig a másik tartályt töltjük, így az erjesztés közben nem kerül a tartályba friss alapanyag, ami egyenletes gáztermelést tesz lehetővé.

Tárolós eljárás

A tároló- és a rothasztótartály, nem két külön berendezés, hanem egy tartály alkalmazásával teszik olcsóbbá a technológiát. A be-és kitárolás szakaszos, ürítésnél csak a következő adag alapanyag beoltásához szükséges iszap marad a tartályban. Szilárd fődémes és fóliasátras kialakítás is lehetséges. Az előbbinél figyelni kell, hogy kitárolásnál ne juthasson be levegő, az utóbbinál számolni kell azzal, hogy a fólia nagyobb hővesztéseget eredményez és a környezeti hatásokat is figyelembe kell venni, fóliafedés, vagy könnyűszerkezetes tető alkalmazásával.

A folyamatos eljárások is többféleképpen lehetnek:

Átfolyós eljárás

A legtöbb biogáz üzem ezt az eljárást alkalmazza. A rothasztótartályba folyamatosan érkezik az alapanyag, és folyamatos az iszap továbbítása a tárolóba. A tartály csak javítás közben van leeresztve. Előnye az egyenletes gáztermelés, és az alacsonyabb költségek.

Hátrány viszont hogy a friss és az erjesztett alapanyag keveredhet, így az anyag kikerülhet a rendszerből mielőtt még a baktériumok teljesen lebontanák.

Kombinált átfolyós-tárolós eljárás

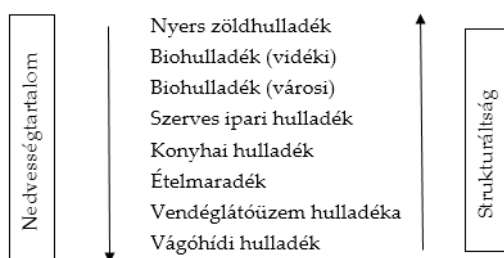
A legfejlettebb technológia, amelynél az átfolyós tartályt fóliasátorral egészítik ki, így kiküszöbölik a nitrogénvesztést, ezáltal több biogáz keletkezik. Lehetőség van arra is, hogy az átfolyótartályt tárolótartályként használják. Ilyenkor részenként kell üríteni és az elvett biogáz mennyiséget pótolni kell, mert ha csökken a nyomás, levegő kerülhet be a rendszerbe.

Egy- vagy többlépcsős eljárás

Egylépcsős esetben az erjesztés fázisai egy rothasztókamrában mennek végbe. Keverős berendezésnél ezek a fázisok párhuzamosan, nem keverősnél térben egymás után következnek. Többlépcsős eljárásnál térben elkülönülnek az erjesztés fázisai, több tartály alkalmazásával, vagy az erjesztőtartály elválasztásával. Gazdaságossági szempontból két-nél több lépcsőt gyakorlatban nem alkalmaznak.

2.4. Biogáz gyártás alapanyagai

A biogáz gyártás szerves anyagok lebontásán alapszik. Azonban nem mindegy, hogy ez a lebontás milyen módon: levegő jelenlétében, vagy levegőtől elzártan megy végbe. A 2. ábra szemlélteti a különböző anyagok lebomlási módjait. Biogáz gyártásnál anaerob bomlás történik, a megfelelő alapanyagok szárazanyagtartalma 5-15%. Ha magas a szárazanyag tartalom, 40-60%, akkor már aerob folyamatról, azaz komposztálásról beszélünk [3].



2. ábra Szerves anyagok tulajdonságai [3]

A szervesanyag tartalomon kívül fontos a megfelelő széntartalom, valamint, hogy az alapanyag ne tartalmazzon gázképződést gátló, illetve mérgező anyagokat.

A technológiai eljárást a rendelkezésre álló alapanyagok fajtája határozza meg. A következő táblázat a legnépszerűbb alapanyagokat és a hozzájuk tartozó technológiákat ismerteti.

1. táblázat Alapanyagok tulajdonságai és az ajánlott technológia [2]

Alapanyag		Javasolt technológia	
minőség	jellemző	megnevezés	jellemző
almos trágya	nagy szervesanyag-tartalom, jelentős mikroba-tartalom, gyommagvak, paraziták	szakaszos erjesztés	nagyobb fajlagos gázkihozatal, jól kezelhető és értékesebb szilárd biotrágya
kommunális hulladék	kicsi szervesanyag-tartalom, jelentős ballasztanyag		
növényi	nagy szárazanyag-tartalom, kevés mikroorganizmus		
hígtrágya	kicsi szervesanyag-tartalom, korlátozott felhasználhatóság	folyamatos erjesztés	kisebb energiaveszteség a fermentor fűtésénél, egyszerű lecsapolás, újratöltés, nem igényel sátoztató-mozgatást, teljes automatizáció lehetősége
szennyvíz	kicsi szervesanyag-tartalom, esetleg nehézfém szennyezés		

2.4.1. AZ ALAPANYAGOK FAJTÁI

Biogáz alapanyagnak minden olyan biomassza alkalmazható, amely a 2.4-es pont kritériumainak megfelel. A biomasszákat három csoportra oszthatók [4, 5]:

Elsődleges biomassza

Ide sorolhatók a lignocellulózok, a mezőgazdaságból származó növények, például: növényi hulladék, szalma, csicsóka, répafélék, kender.

A termesztett lignocellulózok például az energiafű, szudáni fű is egyre elterjedtebb a magas biomasszahozamuk miatt, ami 30-50 t/ha-ra tehető. Főleg más, nagy zsírtartalmú alapanyagokhoz keverik őket, így javítva azok karbontartalmát. A melléktermékként keletkező biotrágya jól hasznosítható. Víztelenítés után a folyadékfázis öntözésre, a szilárd fázis pedig trágyázásra alkalmas. Ez utóbbinak jelentős szerepe van a föld tápanyagpótlásában.

Másodlagos biomassza

Az állattartásból származó hulladékokat, különféle trágyákat sorolunk ide. Az egyes állatok által termelt trágyamennyiség gyakran számosállat egyenértékre van fajlagosítva. A számosállat egyenérték különböző állatfajok számbavételére szolgál, 1 szá = 500 kg évi átlagos élőtömeg [8].

Ebbe a csoportba tartoznak továbbá az élelmiszeripar melléktermékei. Mivel összetételük rendkívül változatos, ezért csak más alapanyagokkal keverve alkalmazható az egyenletes gázhozam biztosítása érdekében.

Harmadlagos biomassza

Harmadlagos biomasszának számít az előző két csoport keveréséből keletkező biomassza, az élelmiszeripar veszélyes hulladékai, valamint az állati dögök, vágóhídi hulladék. Biogáz gyártáshoz használhatunk veszélyes, illetve veszélytelen hulladékokat is. A harmadlagos biomasszák veszélyes hulladéknak számítanak, előkészítésüket az FVM1774/2002 rendelet szabályozza. A veszélyesség alapján első osztályba sorolt hulladékokat (pl.: vadállatok tetemeit, nemzetközi forgalom ételmaradékát) kizárólag égetéssel lehet megsemmisíteni, a többit higienizálás után használhatjuk biogáz előállításra. A hulladékot először darabolni kell, az aprítás méretétől függ a hőkezelés hőfoka és ideje.

Az egyes alapanyagok biogáz hozamát a következő táblázat szemlélteti, ahol az oTS a szerves szárazanyagtartalmat jelenti. Jól látható, hogy az olajos, illetve zsíros alapanyagoknak van a legnagyobb biogázhozama, míg az állati trágyának (főleg a hígtrágyának az alacsony szerves anyagtartalom miatt), és a szennyvíziszapnak a legalacsonyabb. Az élelmiszeripari hulladékoknál a legszélesebb a tartomány, mivel ennek az alapanyagnak a legnagyobb a változatossága.

2. táblázat Egyes alapanyagok biogáz hozama [5]

Alapanyag	Biogáz hozam Nm ³ /kg oTS
Állati trágya	0,20 – 0,55
Burgonyafeldolgozási hulladék	0,45 – 0,50
Élelmiszeripari hulladék	0,30 – 0,80
Gabonafeldolgozási hulladék	0,45 – 0,50
Halfeldolgozási hulladék	0,35 – 0,70
Használt éttermi olajok, zsírok	0,80 – 1,30
Háztartási hulladék	0,40 – 0,60
Szennyvíziszap	0,20 – 0,55
Szeszipari maradékok	0,45 – 0,50
Vágóhídi hulladék	0,35 – 0,70
Zsírleválasztó hulladék	0,70 – 1,30

2.4.2. AZ ALAPANYAGOK JELLEMZŐI

A mikrobák lebontási hatásfoka az alapanyagok tulajdonságaitól függ [3, 4].

Szárazanyagtartalom

Az erjedési folyamat 0,1–60%-os szárazanyag tartalomig végbe tud menni, azonban 5% alatt túl sok víz kerül a berendezésekbe, ezáltal csökken a gazdaságosság, túl magas

szárazanyag tartalom esetén viszont keverésnél lépnek fel problémák, ezért száraz eljárásnál sem mehetünk 50% fölé.

Kémhatás

A gázképződésben szerepet játszó baktériumok eltérő kémhatású közeget igényelnek. A hidrolizáló és fermentatív baktériumok 4,5 illetve 6,3-as pH érték mellett működnek optimálisan, míg a metánképző baktériumok számára a 7-7,5-ös pH a megfelelő. Az alapanyagon belül a pH érték általában kiegyenlítődik, és semlegessé, kissé lúgossá válik. Ha a kémhatás nagyon lecsökken 4-5 körüli értékre, akkor a baktériumok működése lelassul. Ha ez bekövetkezik, lúgos anyagokkal: silótakarmány, tejsavó, mésztej vagy szódaoldat segítségével állítják be a megfelelő értéket.

Szén és nitrogén aránya

A mikroorganizmusoknak sejtjeik felépítéséhez nitrogénre van szükségük. Alacsony nitrogéntartalom mellett nem lehet nagyobb mennyiségű szenet feldolgozni, mert ammónia halmozódik fel. A megfelelő C/N arány 20 – 40 közötti érték.

Nagy anyagfelület

Az erjesztő baktériumok a szabad felületek mentén tudják a lebontást végezni. A cellulóztartalmú anyagokat, például a szalmát strukturálni kell, mivel a lipidek és a lignocellulóz láncok gátolják a lebontást.

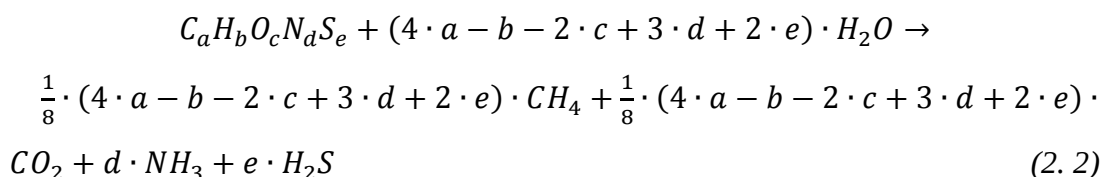
Ha ismerjük az alapanyag pontos kémiai összetételét, akkor meghatározhatjuk a belőle kinyerhető metán mennyiségét. Ennek meghatározására több képlet is született:

A nitrogéntartalmat figyelembe véve Buswell-képlete az alábbi:

$$C_n H_a O_b N_c + \left(n - \frac{a}{4} - \frac{b}{2} - \frac{3}{4} c \right) \cdot H_2 O \rightarrow$$

$$\left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3}{8} c \right) C H_4 + \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3}{8} c \right) C O_2 + c \cdot N H_3 \quad (2.1)$$

A nitrogén mellett a kéntartalmat is figyelembe veszi Boyle képlete:



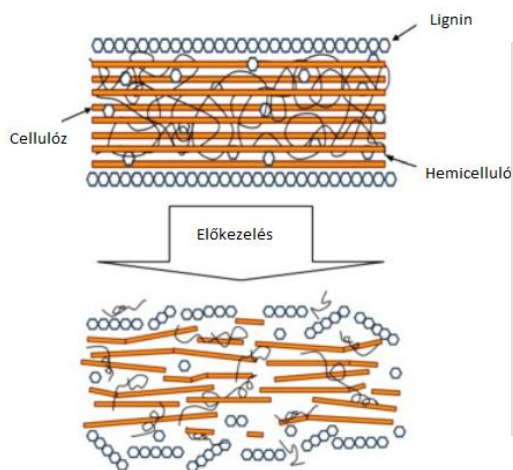
A növényi biomasszák hidrokarbonátot, fehérjét, lignit, lipidet, pektint és ásványi anyagokat tartalmaznak.

2.5. Szerves alapanyagok előkészítési műveletei

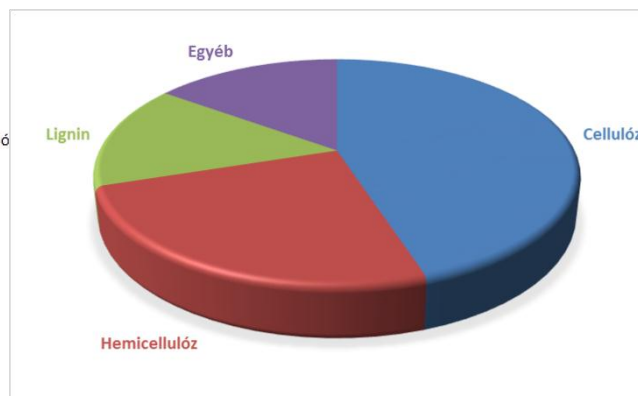
A magasabb biogáz hozam elérése érdekében nem csak az előállítási technológia fejlesztésével kísérleteznek, hanem a rendszerbe beérkező alapanyagok gázképződés szempontjából fontos jellemzőinek javítására is hangsúlyt fektetnek.

Az előkészítés során azonban figyelembe kell venni annak költségeit és a keletkező többlet biogáz mennyiségének függvényéből meg kell határozni az előkészítés létjogosultságát.

A legtöbb előkezelési eljárás a lignocellulóz biomassza javítását tűzte ki célul. A lignocellulóz a 4. ábra szerint többféle anyagból épül fel: cellulózból, hemicellulózból és ligninből. A hidrolizáló baktériumok csak a cellulózt tudják lebontani, azonban a hemicellulóz és a lignin tartalom miatt nehezen férnek hozzá. Az előkezelések célja a lignocellulóz struktúra gyengítése és felbontása a 3. ábrán látható módon, hogy ezáltal a mikroorganizmusok lebontását elősegítsék [6].



3. ábra A lignocellulóz szerkezete [6]



4. ábra A lignocellulóz összetétele [6]

2.5.1. FIZIKAI

A fizikai előkezelés lényege, hogy növelje az alapanyag felületét, valamint csökkentse a polimer láncok méretét.

2.5.1.1. TERMIKUS

Termikus előkezelésnél [7] nő a látszólagos oldhatóság (az anyag megdagad), és jobb biológiai lebontás érhető el. A hidrolízis sebessége állandó, így gyorsabb a biogáz termelődés. Hatékonyan növeli a keletkező biogáz mennyiségét, azonban a magas hőmérsékletű körülmények létrehozása nagyon költséges. Ezen kívül egy meghatározott hőmérséklet túllépésével gátló mechanizmusokat idézhetünk elő a kezelt anyagban.

A következő kísérletben mikroalgák tulajdonságait vizsgálták. A *Chlorella vulgaris* nevű mikroalga termikus előkezelése 140, 160 és 180 °C-on folyt, 10 illetve 20 percen keresztül. A magas nyomású hidrolízist egy 0,5 l térfogatú, rozsdamentes acélból készült autoklávban végezték, melynek fűtését külső elektromos fűtőköpennyel oldották meg. A hőmérséklet gradiensek elkerülése érdekében állandó keverést alkalmaztak, egy 350 1/min fordulatszámú mágneses keverővel. A kívánt hőmérsékleteket 3, 6 illetve 10 bar-os nyomással érték el. Az előkezelés után a reaktort jeges fürdővel hűtötték környezeti hőmérsékletűre. A kezelt alapanyagból ezután batch eljárással termeltek biogázt.

A termikus hidrolízis azonban csak egy bizonyos szintig kedvez a biogáz keletkezésnek. A várható biogáz hozam a következő összefüggés szerint számolható:

$$B(t) = B_0 \cdot (1 - \exp(-K_h t)) \quad (2.3)$$

ahol:

B_0 alapesetben keletkező biogáz hozam $\left[\frac{ml}{1g TS}\right]$

K_h elsőrendű kinematikai konstans $\left[\frac{1}{d}\right]$

t emésztési idő [d]

A kísérlet eredményei is ezt mutatták. A hidrokarbonátok oldhatósága a hőmérséklet növekedésével nőtt, mivel a mikroalgák falának strukturáltsága csökkent. Az anyag oldhatósága 180°C-on volt a legnagyobb, viszont a biológiai lebonthatósága nem. Ez azzal magyarázható, hogy a reakciótermékek keletkezése gátolja a metán termelődését. Az előkezelés 160°C-on volt a leghatékonyabb, ekkor a metánhozam 64%-al nőtt. A kezelés időbeli változása nem eredményezett számottevő javulást, tehát gazdasági szempontból a 10 perces kezelés a kedvezőbb.

2.5.1.2. MECHANIKUS

Aprítás

Mechanikus előkezelés során nem az alapanyag darabolása az elsődleges cél, hanem a mikroorganizmusok számára elérhető fajlagos felület növelése. Legfőbb előnye, hogy nagyjából 23-59% -kal csökkenti az erjesztési időt, ez által 5-25% -kal magasabb biogáz hozamot eredményez azonos idő alatt. Emellett az alapanyag mozgását is megkönnyíti. Hátránya a magas energiaigénye, ezért mérlegelni kell, hogy a megnövekedett gázhozam fedezi-e az előkészítés költségeit [2].

A mechanikus előkezelések közé sorolhatjuk a kavitáció miatt bekövetkező sejtroncsolást. Kavitációt hidrodinamikus és ultrahangos módon is elő lehet állítani. Az ilyen módon történő előkezelés a dolgozat későbbi részében kerül bővebb kifejtésre.

Mikrohullámú előkezelés

Mikrohullámú előkezelést szennyvíziszapnál használnak [8]. Szennyvíziszapnak a szennyvízből leválasztott szilárd részt nevezik. Ez az anyag azonban több nehezen lebontható anyagot, például mosószereket tartalmaz.

A mikrohullámú előkezelést sterilizésre és roncsolásra használják. Előnye a nagy energiasűrűség, ezáltal a gyors felmelegítés.

Az alábbi kísérlet során használt iszap szárazanyagtartalmát 6 m/m%-ra, pH-ját 7,2-re állították be. A mikrohullámú berendezés 2,45 GHz frekvencián működik, illetve teljesítményét 250 és 500W-ra lehet beállítani. Forgó tál biztosítja a megfelelő, egyenletes energiaabszorpciót. A kísérleteket 5 és 10 percig végezték. A mintából előkezelés nélkül mindössze 2 ml/g biogáz keletkezett, míg a legjobb előkezelésnél 135 ml/g. Minél nagyobb teljesítményen, minél tovább folyt az előkezelés annál magasabb biogáz hozamot kaptak, azonban nagyobb teljesítményen és kétszer annyi idő alatt annyival nem keletkezett több gáz, hogy fedezze a többlet energia befektetést.

2.5.3. KÉMIAI

Kémiai előkezelésnél az alapanyaghoz valamilyen savas vagy lúgos vegyszert kevernek, illetve ide sorolják a gőzrobbanást is.

Savas előkezelés

A leggyakrabban a lignocellulóz tartalmú biomasszában alkalmaznak vegyszeres előkezelést [6]. A savak, mint például a kénsav hidrolizáció során a poliszacharidokat monoszacharidokká alakítja, így megkönnyíti a fermentorban lévő hidrolizáló mikroorganizmusok tápanyagfelvételét. Az előkezelést különböző paraméterek mellett végezhetjük: alacsony savkoncentráció és magas hőmérséklet mellett, vagy magas koncentráció és alacsony hőmérséklet mellett. Minél alacsonyabb a hőmérséklet, annál gazdaságosabb a kezelés, de a túl magas savkoncentráció korrodálja a berendezéseket, valamint lebontja a monoszacharidokat is, ezáltal gátolja a fermentációt.

Az előkezelés vizsgálatából több biztató eredmény született: Costal Bermuda fűvet 1,2 m/m%-os kénsavval, 140°C-on, 30 percig kezelve ki tudták nyerni az elméleti cukortartalom 94%-át. Egy másik kísérlet bizonyította, hogy perezetsav segítségével a lignint oldható részekre lehet bontani, igaz ez az eljárás robbanásveszélyes és drága. Egy következő eljárás során cukornádat kezeltek 1 m/m%-nyi kénsavat és 1 m/m% ecetsavat tartalmazó oldattal. Rotációs reaktorban, 190 °C-on 10 percig folyt az előkezelés, melynek végére a hemicellulóz több mint 90%-a lebomlott, viszont a cellulóz degradáció 15% alatt maradt.

Lúgos előkezelés

A lúgok oldhatóvá teszik a lignint és a hemicellulózt, valamint semlegesítik a különböző savakat, hogy a fermentáció számára megfelelő lúgos közeg alakulhasson ki [9].

Lúgos előkezelésnél általában nátrium-hidroxidot használnak. Több kísérleteztek ezzel az anyaggal, hogy megtalálják az előkezelés megfelelő körülményeit. Mohsen Taherdanak mérései során 5 g szárazanyag tartalmú búzához kevert 95 g, 8 m/m%-os nátrium-hidroxid oldatot. Az így kapott keveréket 60 percig melegítette különböző hőmérsékleteken: 0, 25, 50, 75 és 100°C-on, közben 10 percenként megkeverte. Ezt követően még 5 percig keverte a búzát és a hidroxidot, 4800 1/min fordulatszám mellett. Végül desztillál vízzel semlegesítette a lúgos kémhatást. Ezután batch eljárással termelt biogázt az előkezelt szalmákból, majd a keletkező gáz összetételét kromatográf segítségével vizsgálta. A kísérletek alapján 75°C-on bomlott el a lignin és a hemicellulóz legnagyobb része, ugyanis ezen paraméter mellett lett a legjobb a metántartalom: 404 ml/g .

Gőzrobbanás

A gőzrobbanás 160-260°C között megy végbe és időtartama pár másodperctől néhány percig terjedhet [10]. Az eljárás előnye, hogy viszonylag alacsony az energiafelhasználása és kevés hulladékot termel. Az eljárás során a lignin, a cellulóz és a hemicellulóz szerkezete módosul. Így a fermentáció során a baktériumok már könnyen fel tudják bontani a meggyengült szénhidrogénkötéseket.

Az előkezelés során a biomasszát először telített gőzzel melegítik, majd a túlnyomásos rendszerben hirtelen csökkentik a nyomást. A gőz bejut a lignocellulóz belsejébe, és a szálak belsejében lévő vizet kondenzálja. A hirtelen nyomáscsökkenés eredményeként a

víz elpárolog, ezáltal robbanást generál a szálakban. A magas hőmérséklet hatására megkezdődik az acetyl-csoportok hidrolízise, valamint a felszabaduló ecetsav lehetővé teszi a poliszaharidok hidrolízisét is. Ezen kívül részlegesen a lignin is átalakul.

A kísérletek során az előkezelést 180, 190 és 200 °C-on végezték 15 percig egy 2,5 m³-es reaktorban. A reaktorba 136 kg szalmát adagoltak. A kezelés után egy ciklonban választották le a gáz halmazállapotú komponenseket. A gőzrobbanás 200°C-on volt a legintenzívebb és leghatásosabb.

Egy másik változatban a növényi alapanyag aprítás után szállítószalagon került az előkezelőbe, így biztosították a folytonos üzemet. Az anyag először egy előgőzölögtetőbe jutott. Az előgőzölögtető egy vízszintes tartály, amelybe alacsony nyomású gőzt injektáltak, aminek következtében a tartályban lévő hőmérséklet 100°C-ra nőtt, ezáltal a nem kondenzálódó gázok eltűntek. Ezt követően az alapanyag a szállítószalag segítségével a reaktorba jutott. A reaktorban magas nyomású gőzt használtak, hogy a nyomást tovább növeljék. Mivel folytonos a művelet, ezért a felfűtési idő csökkent, így a kezelés időtartama 2 perc volt.

2.5.4. BIOLÓGIAI

A biológiai előkezelés előnye, hogy nem igényel vegyszereket, ezért környezetbarát. Hátrányt jelentenek viszont a magas beruházási költségek, a hosszú üzemidő, a nagy helyigény és hogy a mikroorganizmusok növekedését folyamatosan monitorozni kell [6].

Mikrobiológiai előkezelés

Biológiai előkezelésnél komplex biológiai hatóanyagokat használnak, hogy a növények biológiai lebomlását és az anaerob biogáz képződést javítsák [11]. Ilyen hatóanyag az élesztő. Az élesztő lebontja az alapanyagban lévő cukrot, ezáltal a biomassza növekszik, valamint szétroncsolja a kristályos szöveteket.

Az előkezelés hatásait kísérletekkel vizsgálták. Egy 118 ml-es autoklávba 1 g száraz, őrölt kukoricát és 10 ml desztillált vizet öntöttek. A nyomástartó edényben 120 percig, 121°C-on tartották a keveréket, majd aszeptikus körülmények között hozzáadták a mik-

roorganizmusokat. 20 db mintát készítettek ilyen módon, 19 különböző baktériumot vizsgáltak, a 20. üvegbe a baktérium nélküli kontroll minta került. A minták gáztermelését 5 naponta vizsgálták.

Az előkezelés környezeti hőmérsékleten zajlik, a hozzáadott mikrobiológiai anyagok dózisa 0,01 m/m%, és a kezelési idő 15 nap. Az így keletkezett biogáz hozam 33,07%-kal lett magasabb, mint előkezelés nélküli esetben, a metántartalom 75,57%-kal nőtt és a fermentáció ideje 34,6%-kal csökkent.

Enzimes előkezelés

A beérkező alapanyagot először a hidrolizáló baktériumok kezdik bontani a 2.2. fejezetben említett módon. Ezek a mikroorganizmusok a beérkező lignocellulóz tartalmú anyagból viszont csak a cellulóz láncokat tudják feldolgozni, a lignint és a hemicellulózt nem. Enzimes előkezelésnél olyan mikroorganizmusokat juttatnak a rendszerbe, melyek ezeket az anyagokat is képesek lebontani, ezáltal megkönnyítik a hidrolizáló baktériumok feladatát [12].

Az enzimes előkezelés tanulmányozására Feng-Qin Wang et al. [12] a következő kísérletet végezték: 80 ml nátrium-acetátot és 10 g kukoricakeményítőt kezeltek egy autoklávban 30 percig, 121°C-on. Ezután meghatározott mértékben nátriumot, valamint lakkáz és peroxidáz enzimeket adtak hozzá. A keveréket 45°C-os inkubátorszekrénybe rakták, és 135 1/min-es fordulatszámon 24 óráig kezelték. Majd cellulóz hozzáadásával megismételték az inkubálást. Végül 10 percig 12000 1/min-es fordulatszámmal centrifugálást hajtottak végre a mintákon. Az értékelést folyadék kromatográf segítségével végezték. Az eredmények azt mutatták, hogy az előkezelés javította a kukorica cukorhozamát, így nőtt a tápanyag a hidrolizáló baktériumok számára. Azonban az enzimek gátolják a hidrolizáló organizmusok működését, ezért eltávolításuk szükséges az előkezelés után. Ezt vizes mosással oldják meg.

Egy magyar kutatás a baromfitoll előkezelését, lebonthatóvá tételét vizsgálta. Mivel a toll keratin molekulákat és diszulfid hidakat tartalmaz, ezért fizikai módon csak denatúrálással bontható le. Ezen anyagok lebontására viszont több mikroorganizmus is képes, például a *Bacillus* törzs, a *Fervidobacterium pennovorans*, illetve több gombafaj. A kísérlet során különböző hőmérsékleten kezelték a víz és toll keverékét, majd *Bacillus*

licheniformis baktériummal oltották be. Az 1:1-es keverési arány kivételével az összes minta megfelelő eredményeket hozott, gazdasági szempontból a 70 °C-on történő előkezelés és az 1%-os baktérium hozzáadás volt a legmegfelelőbb [13].

2.5.5. KOMBINÁLT

Az említett előkezelési módszerek külön-külön is használhatóak, azonban együttes alkalmazásukkal tovább lehet javítani a termelt biogáz mennyiségi és minőségi paramétereit. Ilyen kombináció például a termikus-kémiai, vagy a termikus-mechanikus előkezelés.

2.6. A kavitáció elméleti háttere

„A kavitációs buborékok az áramló folyadékban hirtelen fellépő nyomáscsökkenés hatására keletkező apró, 15-50 µm nagyságú gömbök, amik a nagynyomású tartományokba érve gyorsan összeroppannak.” Ezek a vákuum buborékok nagy energia felszabadulása mellett semmisülnek meg. Összeomlásuk nem szimmetrikus, így lökéshullámokat alakítanak ki. Ezáltal képesek a folyadék szárazanyag tartalmát elemeire bontani, eróziót, korróziót okozni. A kavitációra nagy nyomás és hőmérsékletkülönbségek, valamint nagy részecskesebesség jellemző. Mivel a jelenséget hang és fényeffektusok kísérik, ezért szonolumineszcenciának is szokás nevezni [14].

A kavitációnak két főbb fajtája van: tranziens, azaz tehetetlenségi kavitáció és stabil kavitáció [15].

Tranziens kavitáció során a kavitációs üreg először megnő, majd hirtelen összeomlik. A kavitációs üreg szilárd fal felőli oldalán a közegáramlás erőteljesen lecsökken, ezért az üreg falának mozgása asszimmetrikussá válik. A folyadék felőli oldalnak tehát nagyobb a sebessége, tehát gyorsabban fog az üreg középpontja felé mozogni. A leggyorsabb részen túszerű folyadéksugár fog kialakulni, ami átdöfi a buborékot, és a vele szemben levő szilárd falat, ezáltal eróziót okoz.

Stabil kavitációnál a buborék az egyik fázisban növekszik, a másikban fogy, és több cikluson keresztül oszcillál anélkül, hogy összeomlana, vagy a felszínre kerülne. Az osz-

cilláló buborékok saját frekvencián rezegnek, ezáltal turbulenciát hoznak létre. A turbulenciát mikroáramlásoknak is nevezik, melyekre a magas nyíróerő a jellemző, ez felel a sejtbiológiai hatásokért. A stabil kavitációnak kevésbé drasztikusak a hatásai, mint a transziensé.

Kialakulás szerint is megkülönböztethetünk típusokat. A kavitáció lehet ultrahangos, hidrodinamikus, optikai és részecske kavitáció, de az anyag fizikai és kémiai tulajdonságainak megváltoztatására csak az ultrahangos és a hidrodinamikus használható.

2.6.1. A HIDRODINAMIKUS KAVITÁCIÓ ISMERTETÉSE

Hidrodinamikus kavitációt idézhetünk elő a folyadékban Venturi-csővel, fojtószeleppel, vagy zárólemezzel [16]. A szűkülethez érve a kinetikus energia, azaz a folyadék sebessége megnő, ami a helyi nyomás csökkenését eredményezi. Ha a fojtás elegendő ahhoz, hogy a nyomás a kavitációs küszöbérték alá csökkenjen, akkor buborékok alakulnak ki. Ezután a folyadéksugár kitágul, a nyomás megnő és összeroppantja a buborékokat. A szűkületen áthaladva az állandó nyomásesés miatt határréteg leválás következik be, ami turbulenciát okoz. A turbulencia intenzitása a nyomáseséstől, a szűkület geometriájától, és a folyadék áramlási viszonyaitól függ. Tehát jól kialakított geometriával és működési feltételekkel a kívánt fizikai és kémiai változásokat energia hatékony módon érhetjük el.

A legismertebb hidrodinamikus kavitációs berendezés a nagynyomású homogenizátor. Ez egy tartályból és két fojtószelepből áll, hogy két lépcsőben lehessen az üzemi nyomást ellenőrizni. Azonban a nyomáshullámok nagyságát és a kavitáció hatósugarát nem lehet szabályozni, így az intenzitást sem, ezért nem alkalmas a sejtek szétbontására. Főleg élelmiszeriparban és gyógyszeriparban használják emulgeálásra.

Másik módszer a zárólemez használata. A folyadék itt is egy szűkületen folyik keresztül, az áramlási tér csökkenése miatt megnő a folyadék sebessége, ami nyomáscsökkenést okoz. Energiahatékonyság szempontjából fontos a kialakítás. A szűkület lehet egy zárólemez, ami lehet egy vagy többlyukú. Ha többlyukút választunk, akkor különböző kavitációs intenzitást, és rugalmas működést kapunk, a folyadékban különböző nyíróerőket hozhatunk létre.

Két kutató Sampathkumar és Moholkar egy új berendezést terveztek, amely össze- és széttartó fúvókák segítségével hoz létre nyomásváltozást, és ez a nyomásváltozás mozgatja a buborékokat. A buborékok fúvókák segítségével kívülről jutnak be a folyadékáramba. A fúvókák többféle gázzal is működhetnek. Az intenzitás a buborékok méretétől függ, a buborékok mérete pedig a gázelosztó méretétől, a gáz térfogatáramától és a gáz-tartályban lévő nyomástól függ. Kialakítása azonban kevésbé rugalmas, mint a zárólemezes variációnak, mivel csak a fúvókák átmérőjét, és hosszát tudjuk állítani. Felmerül az a kérdés, hogy érdemes-e kombinálni a fúvókás és a zárólemezes elrendezést. Ez az adott eljárás típusától és a kívánt intenzitástól függ.

2.6.2. AZ ULTRAHANGOS KAVITÁCIÓ ISMERTETÉSE

A 20 kHz frekvencia feletti mechanikai hullámokat ultrahangnak nevezzük. Passzív, $10000 \frac{W}{m^2}$ alatt, és aktív, $10000 \frac{W}{m^2}$ felett, ultrahangot különböztethetünk meg. Passzív ultrahanggal különböző anyagi állapotokat és tulajdonságokat írhatunk le. Aktív ultrahang segítségével az anyag szerkezetét alakíthatjuk át mikro- és makroszinten, hullámok és akusztikai jelenségek révén [15]. Ultrahangot kétféleképpen állíthatunk elő: a magnetostrikció jelenség, vagy a piezoelektromosság felhasználásával [14].

A magnetostrikciót, azaz Joule-effektust a ferromágneses anyagok, például vas, rugalmas deformálódása okozza. Nikkel lemezekre tekercseket csavarnak, melyekre váltakozó áramot kapcsolnak. A tekercsek által kialakított mágneses tér hatására a lemezek deformálódnak miközben ultrahangot hoznak létre.

A piezoelektromosság miatt, ha kristályra feszültséget kapcsolunk, akkor alakváltozáson esik keresztül. A folyamatos alakváltozások következtében longitudinális hullámok keletkeznek. Elektromos áram hatására a kristályban a részecskék elmozdulnak. Az elmozdulás továbbítódik egy elektromos rezgő rúdra, amely a kavitációt jobban tűrő anyagból készült. A rúd alternáló mozgást végez, így hozva létre a longitudinális hullámokat. Az ultrahanghullámokkal megegyezően szinuszosan váltakozó nagy nyomáskülönbség hatására a vízmolekulák szétszakadnak, így hozva létre a kavitációt. A képződő buborékok mennyisége az amplitúdó nagyságával egyenesen arányos.

2.7. Koncentráció és abszorbancia viszonya

Az abszorbancia értelmezéséhez a Lambert-Beer-törvény nyújt segítséget [17]. Lambert törvénye kimondja, hogy I_0 intenzitású fény l cm rétegvastagságon áthaladva I intenzitásúra csökken:

$$I = I_0 \cdot 10^{-a \cdot l} \quad (2.4)$$

ahol „ a ” a lineáris abszorpciós tényező.

Az intenzitás csökkenése azzal magyarázható, hogy a megtett út alatt a fény egy része elnyelődik. A fényelnyelés mértéke az abszorbancia:

$$A = \lg \frac{I_0}{I} \quad (2.5)$$

Ezt az előző egyenletbe visszahelyettesítve megkapjuk, hogy az abszorbancia arányos az úthosszal, az arányszám a lineáris abszorpciós tényező.

$$A = a \cdot l \quad (2.6)$$

A Beer-törvény szerint a lineáris abszorpciós tényező arányos az abszorbeáló anyag koncentrációjával:

$$a = \varepsilon \cdot c \quad (2.7)$$

ahol ε a moláris abszorpciós együttható.

A két törvény összevonásából megkapjuk az abszorbancia és a koncentráció közötti összefüggést:

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot l \quad (2.8)$$

Az abszorpció a fény elnyelését jelenti. A fény egy másik hányadát az anyag áteresztí, ezt nevezzük transzmisszióknak. A fényelnyerést gyakran jellemzik a transzmisszióval is:

$$T = \lg \frac{I}{I_0} \quad (2.9)$$

Az abszorbancia több fényelnyelő komponensre is felírható:

$$A_\lambda = l \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\lambda i} \cdot c_i \quad (2.10)$$

ahol: n : a fényelnyelő komponensek száma

λ : az adott hullámhossz

i : az adott komponensek sorszáma

Tehát ha tudjuk egy anyag abszorbanciáját, akkor meg tudjuk határozni a koncentrációját is.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Hogy teljesebb képet kapjak a kavitációról, több kavitációs berendezéssel is kísérleteztem. Az ultrahangos kavitáció vizsgálatát a Nyugat-magyarországi Egyetem, Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Karán végeztem. Az itteni berendezésen a kavitáció hatásfokát vizsgáltam.

3.1. Ultrahangos, rezgő rudas kavitációs berendezés



5. ábra Ultrahangos kavitációs berendezés

Az 5. ábrán látható a berendezés kialakítása. Előnye, hogy vegyszerek hozzáadása nélkül lehet vele őrlőlni, és szakaszosan illetve folyamatosan is üzemeltethető. Hátrányt jelentenek viszont a magas költségek, mivel a rezgő rudat gyakran kell cserélni, hiába készül ellenálló anyagból. Mivel bonyolult a kialakítása, ezért a működtetése is komplikáltabb, mint a hidrodinamikus kavitációé. Magas zajszint, és nagy hőképződés mellett működik, ami szintén hátrányt jelent más aprítókkal szemben. Ügyelni kell az őrlendő szárazanyag mennyiségére is, a folyadék szárazanyagtartalma maximum 1 % lehet. A berendezés frekvenciája 21 kHz. [14]

A berendezés méretéből adódóan kevesebb anyaggal kell dolgozni, mint hidrodinamikus esetben. A kavitálni kívánt anyagot mérőpohárba öntjük és a képen látható szorító karmokkal rögzítjük úgy, hogy a rezgő rúd lógjon bele a folyadékba, de lehetőleg 7,25 cm-re legyen a pohár aljától. Ez a távolság a következő összefüggés alapján számítható:

$$s = v \cdot t = \frac{1450 \frac{m}{s}}{20000 \frac{1}{s}} = 0,0725 \text{ m} \quad (3.1)$$

ahol:

s a keresett távolság [m]

v a hang sebessége vízben: $1450 \left[\frac{m}{s}\right]$

t az idő, mely a frekvenciából számítható: $20 \text{ [kHz]} \rightarrow 20000 \left[\frac{1}{s}\right]$

Ezután bekapcsoljuk a berendezést, majd beállítjuk a megfelelő amplitúdót a forgatógomb segítségével. Jól láthatók a folyadékban keletkező hullámok, a berendezés ajtaját azonban érdemes becsukni a nagy zaj miatt. Megfelelő időközönként mintát veszünk a folyadékból. A mérőpoháron jó érezhető, hogy a víz felmelegedett. Mivel a magas hőmérséklet kedvezőtlen a kavitáció számára, ezért ilyenkor a mérőpoharat hidegvízbe állítva hűtjük. Eztán UV spektrométerrel vizsgáljuk a minták abszorbianciáját.

Ahhoz hogy össze lehessen hasonlítani a berendezéseket, most is ugyan olyan hígítást kellene alkalmazni, mint a hidrodinamikus esetben. A berendezés méretéből adódóan azonban ebben az esetben kevesebb anyaggal lehet csak dolgozni.

A mérőpohárba 200 ml víz fér, ehhez 0,04 g kálium-jodid kellene. Ez azonban túl kevés a kavitáció szempontjából. Először 0,2 g anyaggal végeztem el a kísérletet, az abszorbancia mérés azonban nem hozott megfelelő eredményeket, tehát ennél is több kálium-jodidra volt szükség. Ezután 0,5 grammal is elvégeztem a mérést, ami már megfelelő eredményeket produkált.

3.2. Ultrahangos kavitációs kád



6. ábra A kád felülnézete



7. ábra A kád oldalnézete

A 6. és 7. ábrákon látható készüléket vízzel kell feltölteni. A berendezésben 25 és 75 kHz-es frekvencia gerjeszti a hullámokat a berendezés két végénél. A víz felszínén látszik, hogy hol találkoznak a hullámok, ezen a ponton kell a mérőpoharat belógatni a vízbe úgy, hogy a víz a pohárban lévő folyadék szintjéig érjen. A kavitációt érzékeljük, mivel a pohár mérés közben rázkódik a kezünkben.

A kísérleteket most is különböző ideig kell végezni. A mérőpohárba most is 200 ml víz került, és az eredmények alapján itt elég volt a 0,2 g kálium-jodid is.

3.3. Hidrodinamikus kavitációs berendezés

Dolgozatom fő részében a hidrodinamikus kavitációt vizsgáltam. Kísérleteket folytattam a legjobb hatásfokú munkapont megtalálására, majd megvizsgáltam, hogy milyen üzemi paraméterek mellett kapjuk a legtöbb, megfelelő méretű szárazanyagot. Ezen kísérletek alapján kiderült, hogy mikor lesz az alapanyag a biogáz gyártás szempontjából a leghatékonyabb és az ily módon előkezelt szalmából batch eljárással biogázt termeltem, hogy kiderüljön valóban eredményes volt-e az előkezelés.

A mérések elvégzéséhez az Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kara biztosította számomra a megfelelő eszközöket.



8. ábra A laborban lévő kavitációs gép



9. ábra Furatokkal ellátott tárcsa [14]

Az átfolyásos rendszerű, nagyteljesítményű hidrodinamikusan kavitációs berendezés egyszerű kialakítású, tehát kisebb beruházási költségű készülék, mint a felfebb említett ultrahangos kavitációs eszköz. A jobboldali ábrán látható a kavitációért felelős tárcsa, melynek felületén 10 mm mélységű furatok helyezkednek el. Ez a tárcsa a baloldali képen látható módon villamosmotorral van meghajtva, a motorral azonos fordulatszámon üzemel. A tárcsa egy tőle 3 mm távolságra lévő álló házban található. A folyadék a tárcsa középvonalán érkezik, és a henger palástja felé, a ház és a tárcsa közötti szűk rész felé halad. A furatokba érve a folyadék nyomása hirtelen lecsökken. A szűk résen áthaladva a nyíróerők következtében nagy sebesség gradiens alakul ki, amik roncsolják, szét- szakítják a sejteket. A folyadék a készülék középátmérőjénél távozik, majd addig kering a berendezésen keresztül, míg a kívánt előkezelési szintet el nem érjük. Az eljárás előnye, hogy akár 3 $\frac{m}{m}$ % szárazanyag tartalmú folyadék kezelésére is alkalmas.

A kavitációs egység az alábbi ábrákon látható módon lett beépítve a rendszerbe:



11. ábra A vizsgált rendszer



12. ábra A tartály felülnézete

A fehér műanyag tartályban található a szivattyú, ami a folyadék keringtetéséért felel. A szivattyú a tartály aljáról szívja a vizet és a tetején található csövön keresztül juttatja a kavitációs berendezéshez. A kilépésnél egy by-pass ág is található, aminek kettős feladata van. A szivattyú nagyobb tömegárammal dolgozik, mint a kavitációs egység, ezért a folyadék egy részét, ami nem fér be a kezelőtérbe, külön ágon kell keringtetni. Másik feladata a szalma belemosása a vízbe. A szalma kis sűrűsége miatt felúszik a víz

felszínére, de a lefelé hajló csonkból érkező vízsugár ezt megakadályozza. A kavitációs rész előtt található csap szintén a tisztítást segíti, de ha túl sok víz van a rendszerben, és a szivattyú nem tud elindulni, akkor itt tudunk folyadékot elvenni. A folyadék a tartály felső részén lép vissza. A tartály leeresztésére a fenéken található csap szolgál. A kavitációt előidéző tárcsa forgatását LAMMERS gyártmányú motor végzi.

A szalmával végzett kísérleteknél $1 \div 1,25$ mm-es szalmadarabokat teszünk a berendezésbe. A laborba érkező búzaszalmából ezért „ki kell válogatni” a megfelelő nagyságúakat. Ehhez 3 percig szitáljuk a szalmát, egy Retsch AS 200-as típusú rázószita segítségével. Ezután az alapanyagot különböző fordulatszámokon, különböző ideig őröltük.

3.4. Kálium-jodidos kísérlet

A mérés célja kálium-jodid szeparáció kavitációs berendezéssel. Ennek segítségével tudjuk meghatározni, hogy a berendezés határfoka mely paraméterek mellett lesz a legjobb. Különböző fordulatszámon, különböző időtartalom mellett üzemeltetjük a berendezést, amiben kálium-jodid mellett víz található, hogy a készüléken keresztül szivattyú segítségével tudjuk áramoltatni. Az oldatban 2 g káliumjodid van, a víz mennyisége 10 l. A folyamat sikerességét a jodid koncentrációjából tudjuk, de ezt nem lehet közvetlenül mérni, csak az abszorbanciából visszaszámolni.

Az abszorbancia mérését UV spektrofotométer segítségével végezzük.



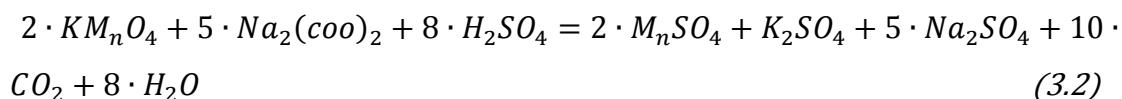
13. ábra Spektrofotométer

A spektrométer 190-900 nm hullámhossztartományban működik. Tudjuk, hogy a mérendő jodid milyen hullámhosszúságú fény elnyelésére képes, ezért a berendezésen a „Wavelength” feliratnál beállítjuk a 355 nm-es hullámhosszt. A készülék használatra kész, ha az „UV Lamp” felirat alatti led világít és jelzi, hogy az UV lámpa be van kapcsolva. A műszeren az „Abs”, azaz abszorbanca mérési módot kell kiválasztani. A vizsgálandó folyadékot egy üvegcsébe, úgynevezett küvettába töltjük, majd a berendezésbe helyezzük, figyelve arra, hogy a küvette külső fala száraz maradjon, és hogy a megfelelő oldala nézzen az érkező UV fény irányába.

A műszer azonban nem csak a jodid fényelnyelését méri, hanem a hozzáadott vizét, és a küvettáét is. Az ebből származó hiba elkerülése érdekében először egy kalibráló oldat abszorbanciáját mérjük meg. A kalibráló oldat jelen esetünkben csak vizet tartalmaz, mert vízben oldottuk a kálium-jodidot. Az így meghatározott abszorbanciához kell viszonyítani a tényleges mérés során kapott abszorbanciákat. A berendezésen az „Auto Zero” gomb benyomásával beállíthatjuk, hogy ezt a korrekciót végezze el, így már a tényleges értéket fogja mutatni.

3.5. Kémiai oxigénigény mérése

A kémiai oxigénigény, azaz KOI oxidáló vegyszerekkel mért oxigénigényt jelent. A KOI az egységnyi térfogatú víz által redukált oxidálószerrel egyenértékű oxigénigény, mértékegysége: mg/ dm³. Ennek segítségével az adott folyadékban lévő szerves anyag mennyiségét határozhatjuk meg. Permanganátos, azaz Kubel-módszer segítségével határozzuk meg a kémiai oxigénigényt. A módszer szerint kénsavat és nátrium-oxalátot kell meghatározott mértékben a vizsgált folyadékhoz keverni. Az oxigénigény számításához ezen anyagok kálium-permanganáttal történő reakcióját kell alapul venni [18]:



A mérés elején összeállítjuk a vizsgált mintát. Ehhez 10 l vizet, és 50 g 1-1,25 mm hosszúságú szalmát (0,5 $\frac{m}{m}$ %) adagolunk a kavitációs készülékbe. Az aprítást különböző

ideig, és különböző fordulatszámok beállítása mellett is elvégezzük. A víz és a szétroncsolt szalma keverékéből mintát veszünk, amit desztillált vízzel elegyítünk. Ahhoz, hogy a vízben lévő apró szemcsék mennyiségét egységesen tudjuk összehasonlítani, a nagyobb szalmadarabokat vákuumszűréssel eltávolítjuk a desztillált vizes hígítás előtt. Egy nagyobb edény szájára gumidugóval tölcserő erősítünk. A tölcserőn apró lyukak találhatók, de mi az ennél kisebb szalmarészekről is meg akarunk szabadulni, ezért szűrőpapírt helyezünk a tölcserőbe. Az edény oldalán található csonkot vízsugárszivattyúhoz csatlakoztatjuk. A felső csatlakozási pontját vízcsapra kötjük, az alsó csatlakozási pontra gumicsövet húzunk, itt fog a víz távozni. A középen található csonkot kötjük össze gumicső segítségével az edényünkkel. A csonkok között a sugárszivattyú kitágul, ezáltal jön létre a vákuum. A vízcsapot egyre jobban megnyitva egyre nagyobb vákuumot, egyre nagyobb szívóerőt hozunk létre a minta szűrésének elősegítésére. A szalmadaraboktól megtisztított folyadékból 2 cm^3 -t lombikba töltünk, majd a lombikot feltöltjük desztillált vízzel míg 100 cm^3 oldatot nem kapunk. A hígítás értéke: $h = 0,02$.

A hígított mintát Erlenmeyer lombikba töltjük és 5 cm^3 1:2 hígítású kénsavat adunk hozzá üvegpipetta segítségével, majd főzőlapon forraljuk. Ha elkezd forni a lombik tartalma egy másik pipetta segítségével 20 cm^3 kálium-permanganátot teszünk hozzá, majd újból felrakjuk a főzőlapra. 5 perc forralás után 20 cm^3 nátrium-oxalátot adunk hozzá, majd elkezdjük a titrálást: bürettából cseppenként adagoljuk a kálium-permanganátot a felforralt keverékünkhöz addig, míg az halványrózsaszínűvé nem változik. A kémiai oxigénigény meghatározásához a mintához csöpögtetett kálium-permanganát mennyiségére vagyunk kíváncsiak.

A mérést a különböző paraméterekkel aprított szalmákból álló minták mindegyikével elvégezzük. A kavitációs eszköz használatánál most is figyelni kell, hogy két indítás között ki tudjon hűlni, illetve új keverék betáplálása előtt mindig ki kell tisztítani.

A kálium-permanganátot sötét üvegben tároljuk, mert fény és hő hatására bomlik. Titrálás közben is elbomlik valamennyi, anélkül hogy a szerves anyaggal érintkezne. Ezt nevezzük vak fogyásnak. Faktorizálással tudjuk ellenőrizni, hogy a kálium-permanganát még mindig 1:1 arányban reagál-e a nátrium-oxaláttal. A gyakorlati fogyás és a vak fogyás összege adja meg az elméleti fogyás mennyiségét.

A vak fogyás meghatározásához a fenti mérést a következőképpen végezzük el. 100 cm^3 desztillál vízhez 5 cm^3 kénsavat és 10 cm^3 nátrium-oxalátot adunk, majd forraljuk. Ezután titráljuk hozzá a kálium-permanganátot, amíg színt nem vált, és a hozzáadott térfogat lesz a vak fogyás [19, 20].

A kénsav, a kálium-permanganát, és a nátrium-oxalát reakciójában katalizátorként szerepel, a forralás is ezt a folyamatot gyorsítja.

A mérésnél a permanganometria szabályai szerint adagoltuk az egyes anyagokat.

3.6. A termelt gáz és metán mérése

A kémiai oxigénigény méréseéből megtudtuk, hogy 2500 1/min fordulatszámon, 4 perces kezelést alkalmazva érhetjük el az 5-10 μm (szűrő nyílásméret) alatti szalmadarabokból a legnagyobb arányt. Az irodalomkutatás alapján minél kisebbek a szalmadarabok, annál több a lebontó baktériumok számára a hozzáférhető felület, annál több lesz a kinyert biogáz, valamint a gáz metántartalma. Tehát a kísérlethez 2500 1/min-es fordulatszámon, 4 percig kezelt szalmát használunk.

A szalmát azonban még össze kell keverni szennyvíziszappal, hogy a lebontási folyamatok be tudjanak indulni. A felhasznált iszap a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepről származik, tulajdonságait a táblázat foglalja össze.

3. táblázat A szennyvíz paraméterei

A szennyvíziszap tulajdonságai		
felhasznált mennyiség	121,3	g
szárazanyag tartalom	3,08	%
szerves szárazanyag tartalom	64,24	%

A megőrölt szalmát üvegedénybe töltve összekeverjük 121,3 g szennyvíziszappal, majd feltöltjük vízzel, míg az alapanyag térfogata 400 ml nem lesz. Az üveget ezután gumidugóval lezárjuk, majd a benne lévő levegőt eltávolítjuk. Ehhez beszúrunk a gumidugóba egy tűt, aminek nyitott a vége, tehát rajta keresztül a levegő tud távozni, majd egy másik tűt szúrunk bele, ami egy nitrogénpalackhoz van csatlakoztatva. A palackból

nitrogént engedve az üvegbe, a benne lévő levegőt ki tudjuk nyomni. A biogázt batch eljárással termeljük, mivel egy adagban tettük be az alapanyagot az üvegekbe, és a fermentációs folyamat végéig nem adunk hozzá további anyagokat.

Mezofil fermentációnál a baktériumoknak 37,5 °C-ra van szükségük ahhoz, hogy a lebontást megfelelően tudják végezni. Ezért vagy betesszük az üvegeket egy inkubátorszekrénybe, vagy a 14. ábrán látható módon fűtött víz fürdőbe tesszük. A képen látható zöld polimer darabok hőszigetelés céljából úsznak a vízben.

Ezután egy gumicső segítségével az üveget egy vízzel töltött másik csővel kötjük össze, ami szintén gumicsővel van összekötve egy harmadik, már nyitott üveggel, a 14. ábrán látható módon. Mikor a biogáz termelése megkezdődik, akkor a gáz átkerül a vízzel töltött üvegbe, abból kiszorítja a vizet a harmadik, eddig üres üvegbe. A harmadik üvegbe átkerült víz mennyiségét mérleg segítségével megmérve megtudjuk a keletkezett biogáz mennyiségét.



14. ábra Batch eljárás



15. ábra Gázkromatográf

A biogáz metántartalmát gázkromatográf segítségével mérjük. A laborban DANI Master Fast Chromatograph típusú, a 15. ábrán látható berendezés található.

Bekapcsolás előtt a gázpalackokat ki kell nyitni, melyekben hélium, levegő és hidrogén található. A palackokon a következő nyomásszinteket kell beállítani: hélium 8 bar, levegő és hidrogén 3 bar.

A kromatográf három üzemmódban működik:

- FID method: csak a metáncsúcsot rajzolja ki a berendezés, viszont gyorsan kapunk eredményt
- TCD method: minden csúcs látszik, viszont a mérés lassú

➤ szelep method: FID és TCD mérés is megvalósul, viszont sok, legalább 10-20 ml gáz szükséges

Mivel a biogáz minősége a metántartalomtól függ, ezért elsősorban erre vagyunk kíváncsiak, tehát az FID method-ot választjuk.

Ezután a „flame” parancs segítségével bekapcsoljuk a lángot, és várunk míg 100°C-ra melegszik a kromatográf belseje. A számítógépen beállítjuk, hogy milyen néven mentse el az eredményeket.

A mérés kezdetén megnyomjuk a mérőpanelen a START feliratot. Ezután Hamilton fecskendővel biogáz mintát veszünk az üvegből, amiben a fermentáció folyik. Először átöblítjük a tűt, a beszívott gázt kifújuk, ezáltal ha maradtak volna esetleges gázcsoportok a tűben az előző mérésekből, most azok is távoznak, így nem befolyásolják a mérést. Ezután beszívjuk a mérendő mintát, amiből 50 µl-t kell a kromatográfba juttatni. Figyelni kell arra, hogy a berendezés paneljén a gáz befecskendezésével egy időben nyomjuk meg a START-ot. A mérés körülbelül 5 percig tart, ezután a készülék kirajzolja a metáncsoportot. Ezt az értéket azonban még kalibrálni kell, hogy megkapjuk a valós metántartalmat.

Ezután kikapcsoljuk a berendezést. A leállítás elindítása után megvárjuk, míg 60 °C alá hűl a berendezés hőmérséklete, ezután kikapcsoljuk a programot, majd a készüléket, végül elzárjuk a gázpalackokat [21].

A minták biogáz termelését, és annak metántartalmát két-háromnaponta kell mérni.

4. EREDMÉNYEK

4.1. Ultrahangos, rezgő rudas kavitáció

0,2 g kálium-jodid szeparációjánál a következő abszorbancia értékeket kaptam:

4. táblázat 0,2 g kálium-jodid szétválasztása után keletkező jód abszorbanciája [1]

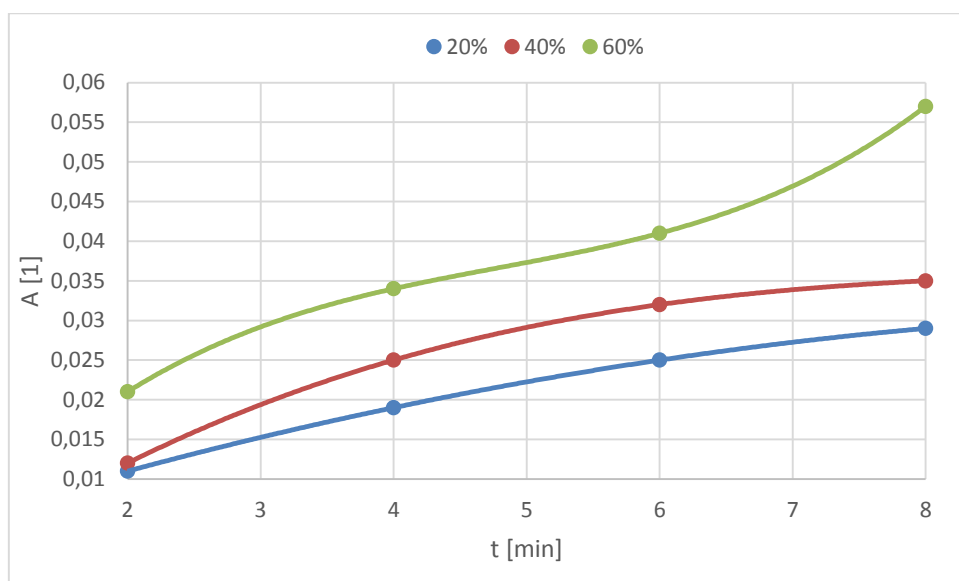
	Intenzitás [%]			
Idő [min]	20	40	60	80
2	-0,029	-0,045	0,04	-0,069
4	-0,034	-0,08	-0,018	-0,083
6	-0,03	-0,08	-0,024	-0,051
8	-0,037	-1,04	-0,034	-0,09

Az értékek többsége negatív, és nem követik azt a tendenciát, amit a hidrodinamikus kísérlet alapján várnánk. Ez feltételezhetően a túl kevés szeparálandó anyag következménye. A mérési eredményeket a spektrométerbe kerülő víz is ronthatja, de törlőkendő segítségével próbáltam a készüléket szárazon tartani.

0,5 g kálium-jodid szétválasztásánál már szebb eredményeket kaptam:

5. táblázat 0,5 g kálium-jodid szétválasztása után keletkező jód abszorbanciája [1]

	Intenzitás [%]		
Idő [min]	20	40	60
2	0,011	0,012	0,027
4	0,019	0,025	0,032
6	0,025	0,032	0,034
8	0,029	0,035	0,057



16. ábra Különböző intenzitások mellett mért abszorbanciák [1]

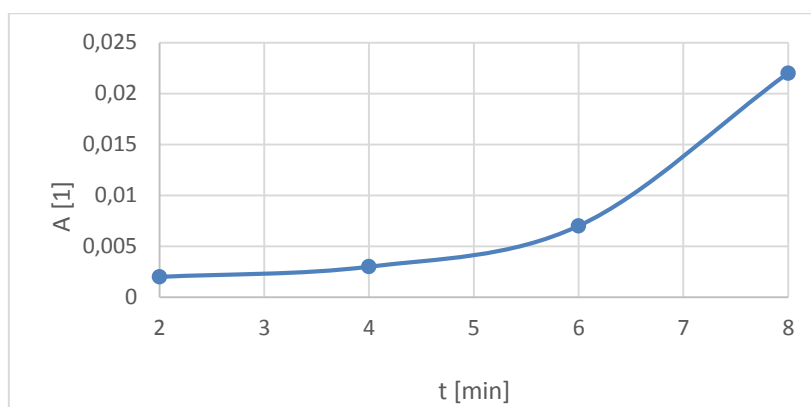
Láthatjuk, hogy a hidrodinamikus esethez hasonlóan a kezelési idő függvényében nő az abszorbancia. A méréssel sikerült alátámasztani az elméletet is, miszerint nagyobb intenzitásnál nagyobb a hatások is.

4.2. Ultrahangos kavitációs kád

A kavitációs káddal végrehajtott kísérlet eredménye:

6. táblázat Mért abszorbanciák

Idő [min]	Abszorbancia [1]
2	0,002
4	0,003
6	0,007
8	0,022



17. ábra A kapott abszorbanciák ábrázolása az idő függvényében

Az abszorbanca itt is növekszik az idő függvényében. Az berendezés hátránya, hogy a mérőpoharat kézzel kell tartani, egy tartószerkezet hozzáépítése azonban nem jelentene magas beruházási költséget. Szalma előkezelésére azonban nem lenne megfelelő a készülék, mivel ipari körülmények között nagy lenne a kád beruházási költsége.

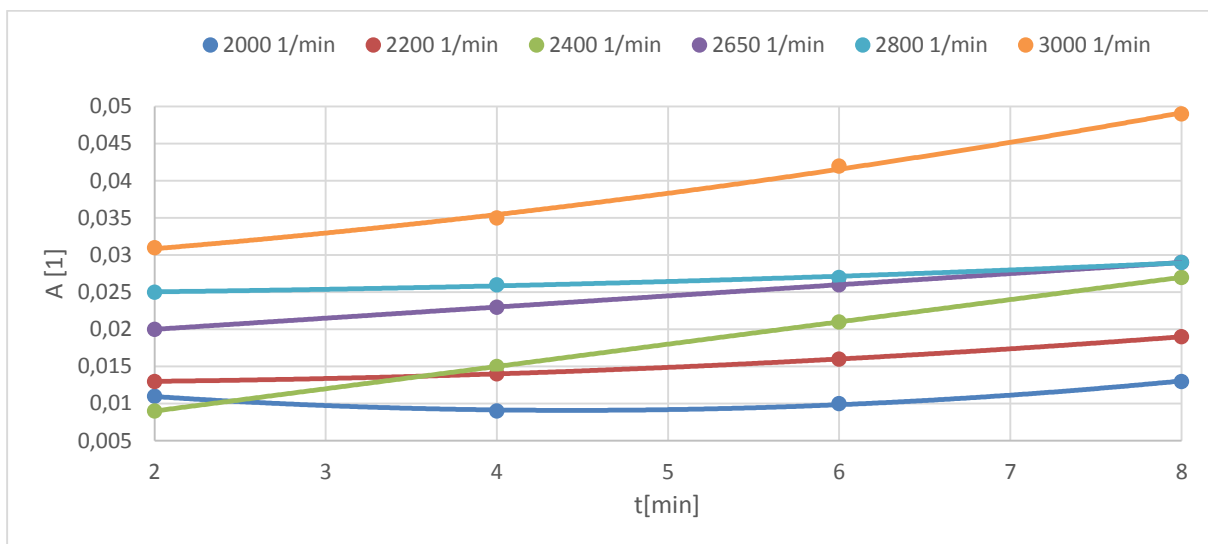
4.3. Kálium-jodidos kísérlet

A mért értékeket az alábbi táblázatokban foglaltam össze:

7. táblázat Különböző fordulatszámok és kezelési idők mellett kapott abszorbanca értékek

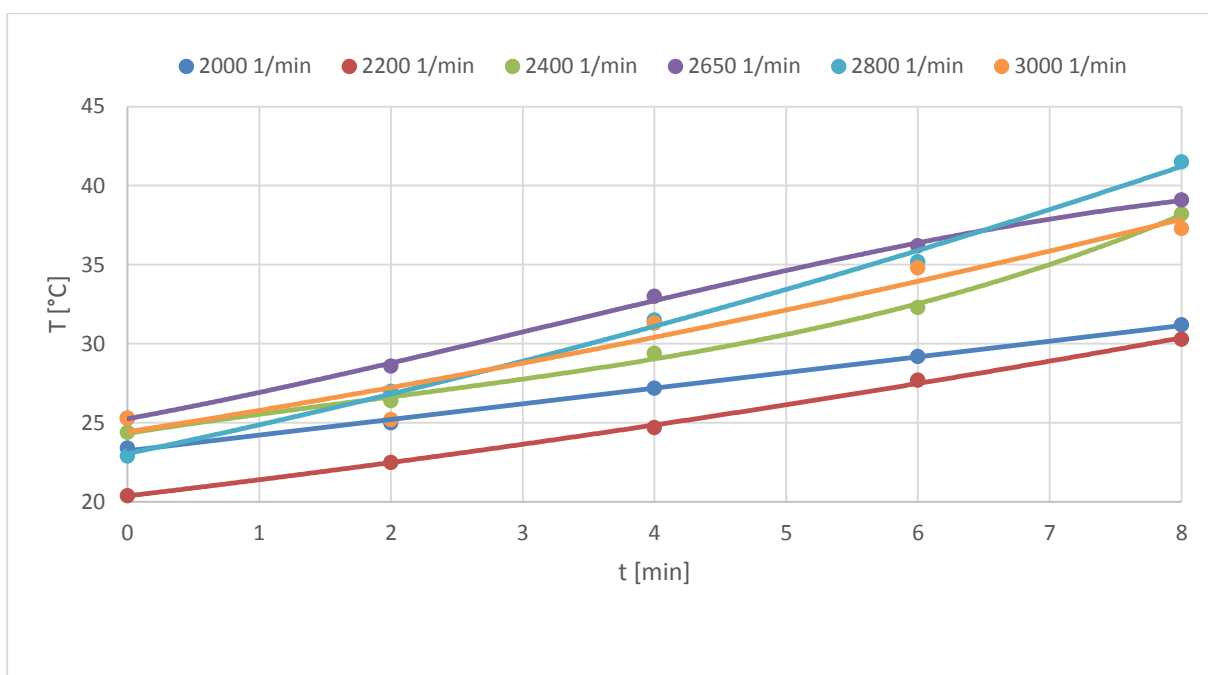
Fordulatszám	Kezelési idő							
	2 min		4 min		6 min		8 min	
	Hőmérséklet	Abszorbanca	Hőmérséklet	Abszorbanca	Hőmérséklet	Abszorbanca	Hőmérséklet	Abszorbanca
1/min	°C	1	°C	1	°C	1	°C	1
2000	25	0,011	27,2	0,009	29,2	0,01	31,2	0,013
2200	22,5	0,013	24,7	0,014	27,7	0,016	30,3	0,019
2400	26,4	0,009	29,4	0,015	32,3	0,021	38,2	0,027
2650	28,6	0,02	33	0,023	36,2	0,026	39,1	0,029
2800	27	0,025	31,5	0,026	35,2	0,027	41,5	0,029
3000	25,2	0,031	31,3	0,035	34,8	0,042	37,3	0,049

A táblázat és a 18. ábra alapján látszik, hogy minél tovább tartózkodik az anyag a kavitációs berendezésben, annál jobban szétválík a jodid a káliumtól, annál jobb az aprítás hatásfoka.



18. ábra Különböző fordulatszámok mellett kapott abszorbanciák

A 18. ábrán látható, hogy nem csak az időtartam függvényében, hanem a fordulatszám függvényében is nő a szeparáció hatásfoka. A 2400 1/min-es fordulatszámú üzem mellett 2 perc elteltével nagyon alacsony abszorbanciát mértem, ez mérési hibának tekinthető.



19. ábra Különböző fordulatszámok mellett mért felmelegedés

A 19. ábrán a szeparáció idejének függvényében látható a kavitációs egység hőmérséklete. Látható, hogy az üzemidő növekedésével nő a hőmérséklet. Ezt a növekedést azonban nem lehet fordulatszámonként összehasonlítani, mivel nem azonos hőmérsékletek mellett kezdtem el mérni az egyes esetekben.

A kálium-jodidos kísérlet szerint tehát annál jobb a berendezés hatásfoka, minél magasabb fordulatszámon, minél több ideig végezzük a szeparációt. 3000 1/min fordulatszám fölé nem mehetünk, mivel a kavitációs egységet működtető motornak ennyi a maximális fordulatszáma.

4.4. Kémiai oxigénigény számítása

Az f-faktor meghatározása a következő képlet [18] alapján történt:

$$f = \frac{\text{gyakorlati fogyasztás}}{\text{elméleti fogyasztás}} \quad (4.1)$$

A gyakorlati fogyasztás az a kálium-permanganát térfogat, amennyi a sima desztillált vizes folyadékot rózsaszínre festette. Ez 9,4 ml volt. Az elméleti fogyasztás az a kálium-

permanganát mennyiség, ami akkor kellene, ha a kálium-permanganát és a nátrium-oxalát egy az egyhez arányban reagálnának egymással. Mivel a desztillált vízhez 10 ml nátrium-oxalátot adtunk, így az elméleti fogyás 10 ml.

$$f = \frac{\text{gyakorlati fogyás}}{\text{elméleti fogyás}} = \frac{9,4}{10} = 0,94 \quad (4. 2)$$

A vak fogyás az elméleti és a gyakorlati fogyás különbsége:

$$\text{elméleti fogyás} - \text{gyakorlati fogyás} = 0,6 \text{ ml} \quad (4. 3)$$

Kémiai oxigénigény meghatározása [18] alapján:

$$KOI = (a - b) \cdot f \cdot \frac{80}{V} \quad (4. 4)$$

ahol:

a: a meghatározásnál fogyott kálium-permanganát térfogata [ml]

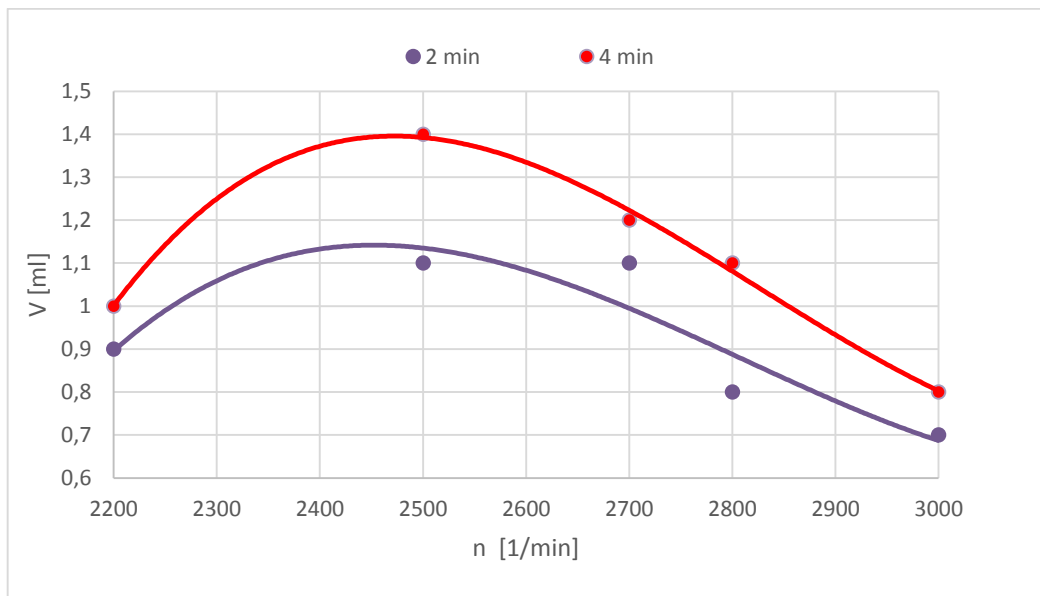
b: vakfogyás térfogata [ml]

80: az oxigén egyenérték súlyából, és az 1 l térfogatra való átszámításból adódó érték

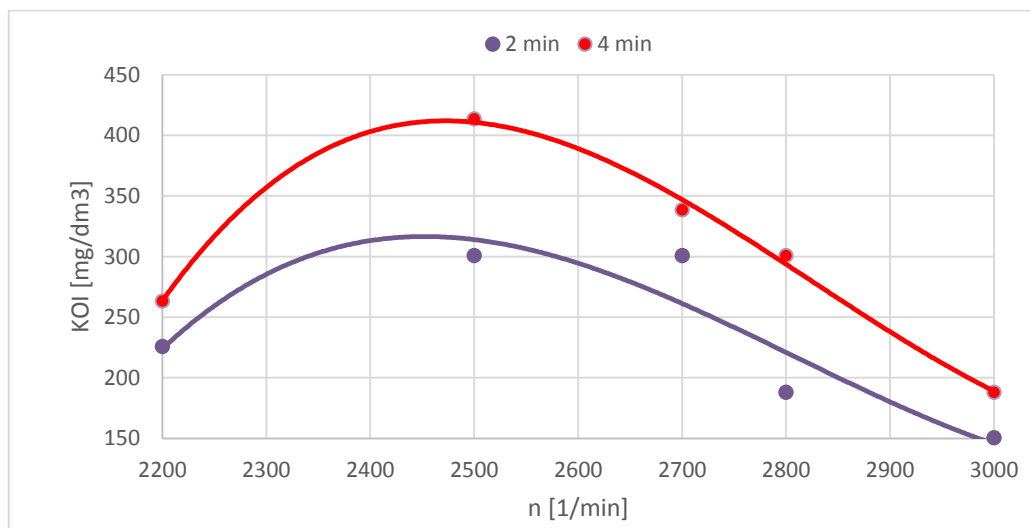
A következő táblázat tartalmazza a mért kálium-permanganát térfogatokat, és a fenti képlet alapján kiszámolt kémiai oxigénigényt.

8. táblázat Szükséges kálium-permanganát mennyisége [ml]

Fordulat- szám	Kálium-permanganát [ml]		Kémiai oxigénigény [mg/dm ³]	
	2 min	4 min	2 min	4 min
1/min	2 min	4 min	2 min	4 min
2200	0,9	1	225,6	263,2
2500	1,1	1,4	300,8	413,6
2700	1,1	1,2	300,8	338,4
2800	0,8	1,1	188	300,8
3000	0,7	0,8	150,4	188



20. ábra Különböző fordulatszámok és időtartam alatt mért kálium-permanganát mennyiség



21. ábra Különböző fordulatszámok és időtartam alatt kapott kémiai oxigénigény

A 20. ábra a szükséges kálium-permanganát mennyiséget, a 21. ábra pedig a kémiai oxigénigényt mutatja az egyes fordulatszámok mellett kezelt szalmás vízre. Mivel ez a két érték egymással egyenes arányosságban van, ezért a két diagram görbéi hasonlóak.

Láthatjuk, hogy először a fordulatszám növekedésével nő a kémiai oxigénigény, tehát több lesz benne a megfelelő méretű szerves anyag, egyre jobb lesz a kezelés. Egy csúcs elérése után azonban a görbék meredeksége megváltozik. Ezek szerint a kavitáció nem

úgy hat az előkezelésre, mint a szeparációra, hogy nagyobb fordulatszámnál mindig jobb eredményt kapunk.

Az időtartam növelése itt is ugyan olyan hatású, mint a szétválasztásnál. Több idő alatt jobb eredményt érünk el.

4.5. Batch mérés

A kémiai oxigénigény vizsgálatából kiderült, hogy milyen üzemi paraméterek mellett lesz legmegfelelőbb az alkalmazott előkezelés, mikor lesz a megfelelően apró szalma részaránya a legnagyobb, tehát mikor lesz a lebontó baktériumok számára a legtöbb hozzáférhető felület, mikor lesz legjobb a biogáz kihozatal.

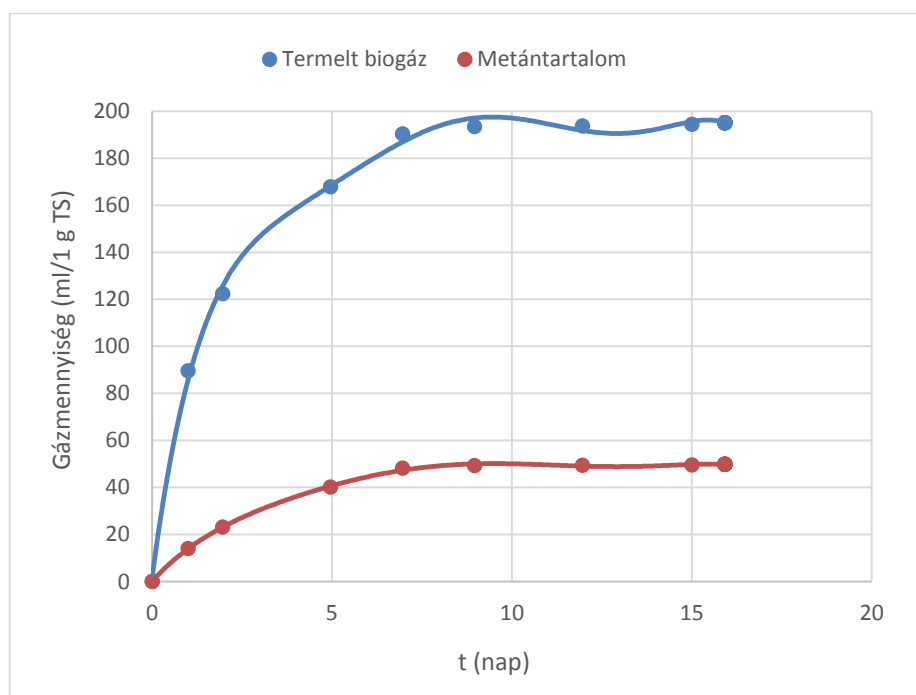
Az egyik előkezelési csúcs 2500 1/min-es fordulatszám, és 4 perces működés mellett figyelhető meg, ezért az ilyen paraméterek mellett aprított búzaszalma biogáz termelését vizsgálom meg. Az előkezelt szalmából keletkező biogázt ezután összehasonlítom a kezelendő szalmából képződő gázzal, valamint a pozitív és a negatív kontrollal.

Ahhoz hogy a kapott eredmények összehasonlíthatóak legyenek, mind a négy esetben ugyan annyi szerves szárazanyagot kell felhasználni. Az aprított szalmát nem szárítjuk meg, így vízzel együtt a szárazanyag tartalma csak 0,5 %. Az felhasznált szalmánkra az jellemző, hogy az összes szárazanyag 94,19 % szerves. A mintába 254,8 g vizes szalma kerül.

A következő táblázat mutatja az őrölt szalmával végzett kísérlet eredményeit:

9. táblázat Az előkezelt szalmából kinyert gáz paraméterei

Mért értékek			Napokra lebontva		
Mérés időpontja	Biogáz hozam	Metán tartalom	Eltelt napok	Biogáz hozam	Metán tartalom
	ml/1g TS	ml/1g TS		ml/1g TS	ml/1g TS
2013. 10. 10. 12:00	89,61	14,03	1	89,6	14,0
2013. 10. 11. 11:00	34,17	9,57	2	122,4	23,2
2013. 10. 14. 11:00	15,16	5,65	5	167,8	40,1
2013. 10. 16. 11:00	11,20	4,04	7	190,2	48,2
2013. 10. 18. 11:00	1,55	0,55	9	193,4	49,3
2013. 10. 21. 11:00	0,11	0,04	12	193,7	49,4
2013. 10. 24. 12:00	0,23	0,06	15	194,4	49,6
2013. 10. 25. 10:00	0,75	0,21	16	195,1	49,8



22. ábra Az előkezelt szalmából termelt biogáz mennyisége és annak metántartalma

A mért biogáz hozamot és metántartalmat ez eltelt idő függvényében ábrázoltam. A biogáz az első pár napban gyorsan termelődik, majd a 7. nap környékén visszaesik a gázképződés. Az utolsó pár napban alig keletkezett gáz, mivel a baktériumok addigra már lebontották a szervesanyag tartalom döntő hányadát.

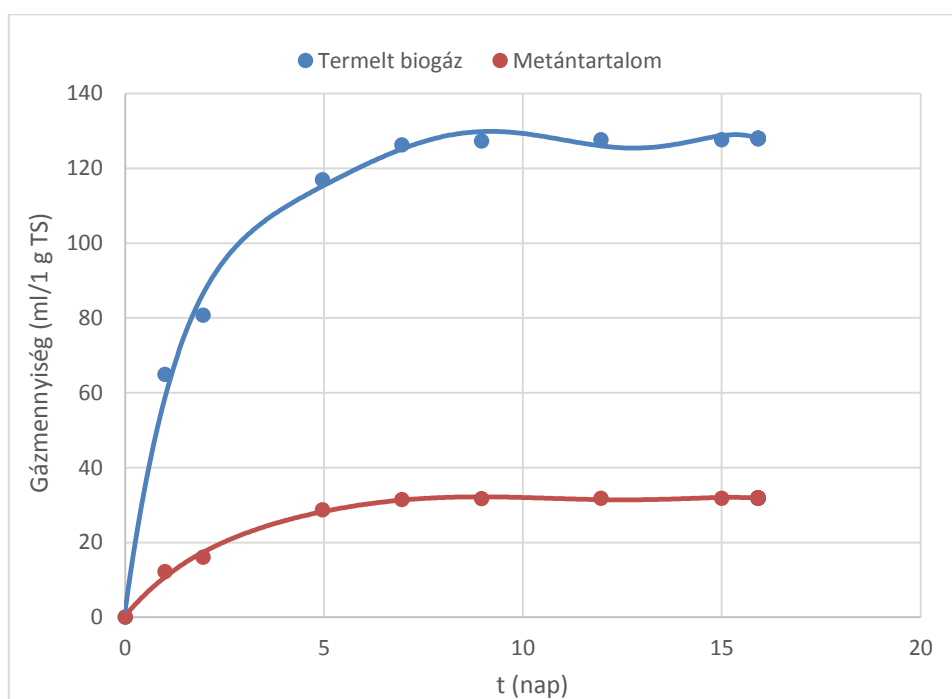
További mérésekkel meg lehetne határozni a fermentáció végén maradt szervesanyag tartalmat.

A metántartalmat leíró görbének hasonló alakja van, mint a biogáz görbéjének, azonban az elején nem figyelhető meg olyan nagymértékű növekedés. A gázképződés leállásával a metántartalom sem nőhet tovább, ugyanakkor kezd stagnálni mind a két görbe.

A következő táblázat és diagram az előkezelés nélküli búzaszalmából előállított biogáz tulajdonságait mutatja. A kezeletlen szalma szárazanyagtartalma 1,5 % és a szárazanyag tartalomnak itt is (mivel ugyan azzal a szalmával dolgozunk) 94,19%-a a szerves rész, ezért 84,9 g kerül belőle a mintába.

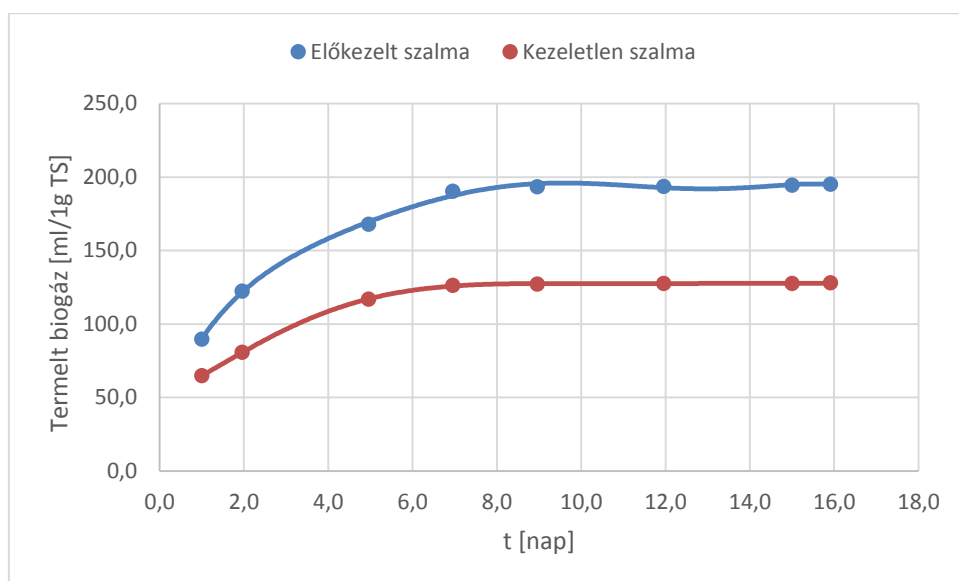
10. táblázat A kezeletlen szalmából kinyert gáz paraméterei

Mért értékek			Napokra lebontva		
Mérés időpontja	Biogázhozam	Metán tartalom	Eltelt napok	Biogázhozam	Metán tartalom
	ml/1g TS	ml/1g TS	db	ml/1g TS	ml/1g TS
2013. 10. 10. 12:00	64,84	12,16	1,0	64,8	12,2
2013. 10. 11. 11:00	16,56	4,04	2,0	80,7	16,0
2013. 10. 14. 11:00	12,07	4,22	5,0	116,9	28,7
2013. 10. 16. 11:00	4,66	1,37	7,0	126,2	31,4
2013. 10. 18. 11:00	0,52	0,14	9,0	127,3	31,7
2013. 10. 21. 11:00	0,11	0,02	12,0	127,6	31,8
2013. 10. 24. 12:00	0,00	0,00	15,0	127,6	31,8
2013. 10. 25. 10:00	0,38	0,06	15,9	128,0	31,8



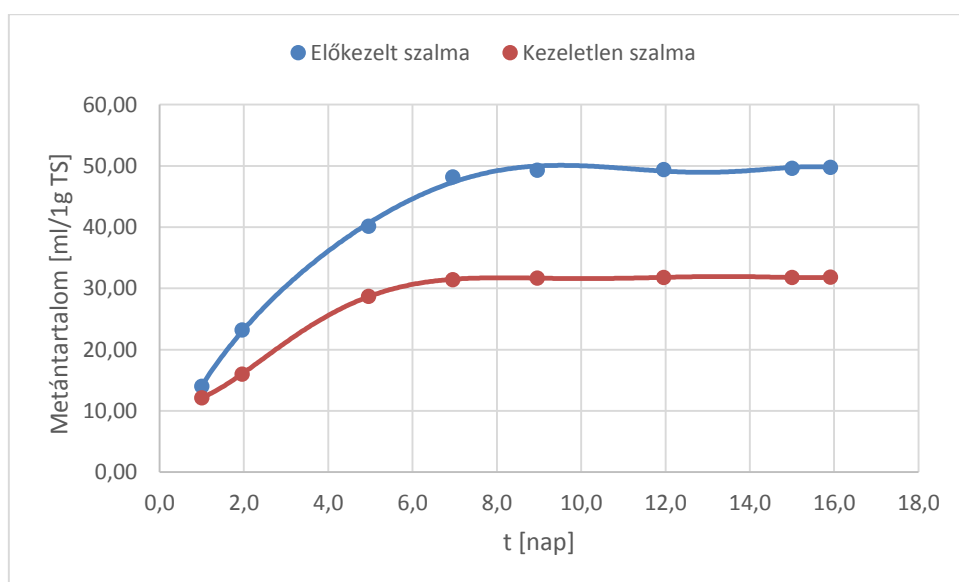
23. ábra A kezeletlen szalmából termelt biogáz mennyisége és annak metántartalma

Az előkezelés nélküli szalma gáztermeléséből rajzolt görbék hasonló alakúak, mint az előkezelté. Itt a 7. nap környékén áll le a gáztermelés.



24. ábra Kezelt és kezeletlen szalma biogáz termelése

A fenti táblázaton látható az előkezelt és a kezeletlen szalmából képződő biogáz mennyisége. Az előkezelés létjogosultságát bizonyítja, hogy az előkezelt szalmából közel 35%-kal több gáz keletkezett.



25. ábra Kezelt és kezeletlen szalmából termelődött metán

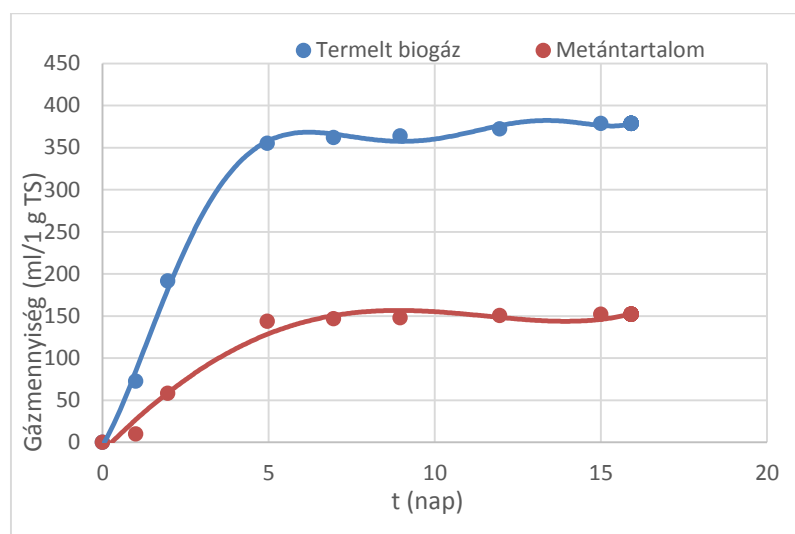
Ha a termelt biogáz metántartalmát hasonlítjuk össze a két esetben, akkor látszik, hogy nem csak nagyobb biogáz hozam érhető el előkezeléssel, hanem a keletkező gáz minősége is sokat javul. A kezelt szalmából termelődő gáz metántartalma több mint 35%-al nagyobb, mint a kezeletlené.

Pozitív kontrollnak azt a mintát nevezzük, amiben csak cellulóz van, tehát a hemicellulóz és a lignin nem hátráltatja a gázképződést. Ennek a mintának a legjobb az eredményei, mivel az előkezelés során nem tudjuk 100%-ig hozzáférhetővé tenni a cellulózt a baktériumok számára.

Ebben az esetben a következő eredményeket kaptam:

11. táblázat A pozitív kontrollból képződött biogáz paraméterei

Mért értékek			Napokra lebontva		
Mérés időpontja	Biogázhozam	Metán tartalom	Eltelt napok	Biogázhozam	Metán tartalom
	ml/1g TS	ml/1g TS	db	ml/1g TS	ml/1g TS
2013. 10. 10. 12:00	72,93	10,035	1	72,9	10,0
2013. 10. 11. 11:00	124,08	50,35	2	191,8	58,3
2013. 10. 14. 11:00	54,5	28,52	5	355,3	143,9
2013. 10. 16. 11:00	3,284	1,58	7	361,9	147,0
2013. 10. 18. 11:00	1,037	0,46	9	364,0	147,9
2013. 10. 21. 11:00	2,765	0,89	12	372,3	150,6
2013. 10. 24. 12:00	2,159	0,529	15	378,8	152,2
2013. 10. 25. 10:00	0	0	16	378,8	152,2



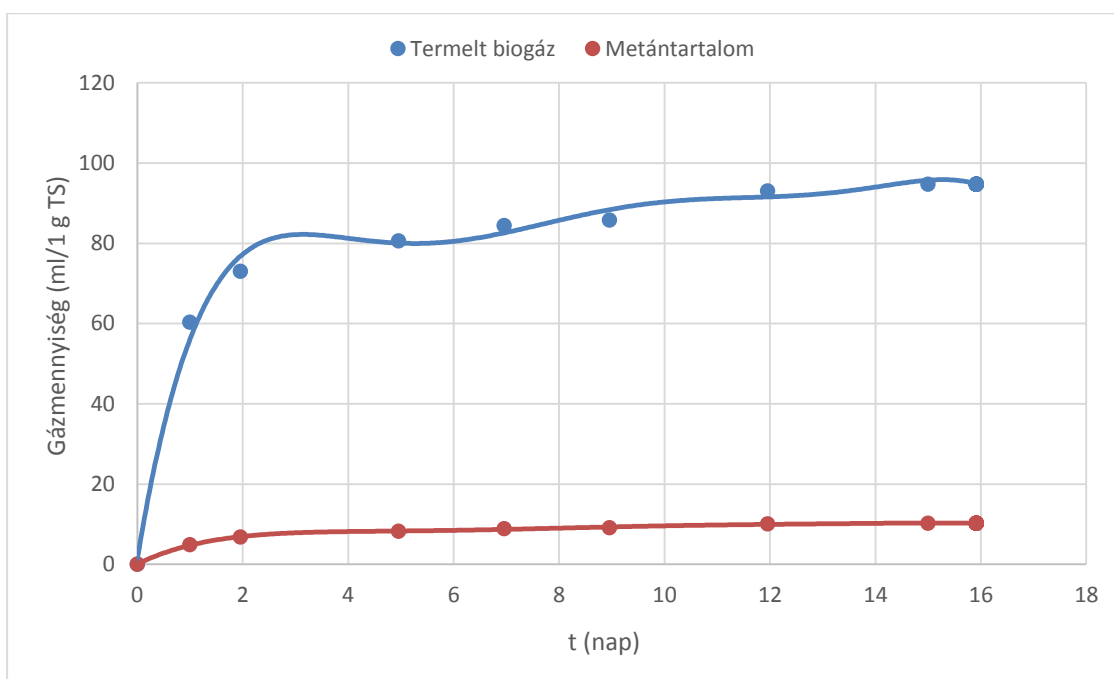
26. ábra A pozitív kontrollból termelt biogáz és annak metántartalma

Ennek a mintának a gázhozama is úgy alakul, mint azt várjuk. A biogáz termelődés az 5. naptól kezdve esik vissza.

Negatív kontrollnak azt a mintát nevezzük, amelyben csak szennyvíz van, hozzáadott cellulóz nincs. Mivel nem tartalmaz cellulózt, ezért ettől a mintától várjuk a legrosszabb eredményeket.

12. táblázat A negatív kontrollból képződött biogáz paraméterei

Mért értékek			Napokra lebontva		
Mérés időpontja	Biogázhozam	Metán tartalom	Eltelt napok	Biogázhozam	Metán tartalom
	ml/1g TS	ml/1g TS	db	ml/1g TS	ml/1g TS
2013. 10. 10. 12:00	60,31	4,885	1	60,31	4,88
2013. 10. 11. 11:00	13,31	1,97	2	73,06	6,77
2013. 10. 14. 11:00	2,53	0,49	5	80,64	8,23
2013. 10. 16. 11:00	1,89	0,33	7	84,43	8,89
2013. 10. 18. 11:00	0,689	0,11	9	85,81	9,1
2013. 10. 21. 11:00	2,41	0,31	12	93,05	10,04
2013. 10. 24. 12:00	0,57	0,064	15	94,77	10,23
2013. 10. 25. 10:00	0	0	16	94,77	10,23



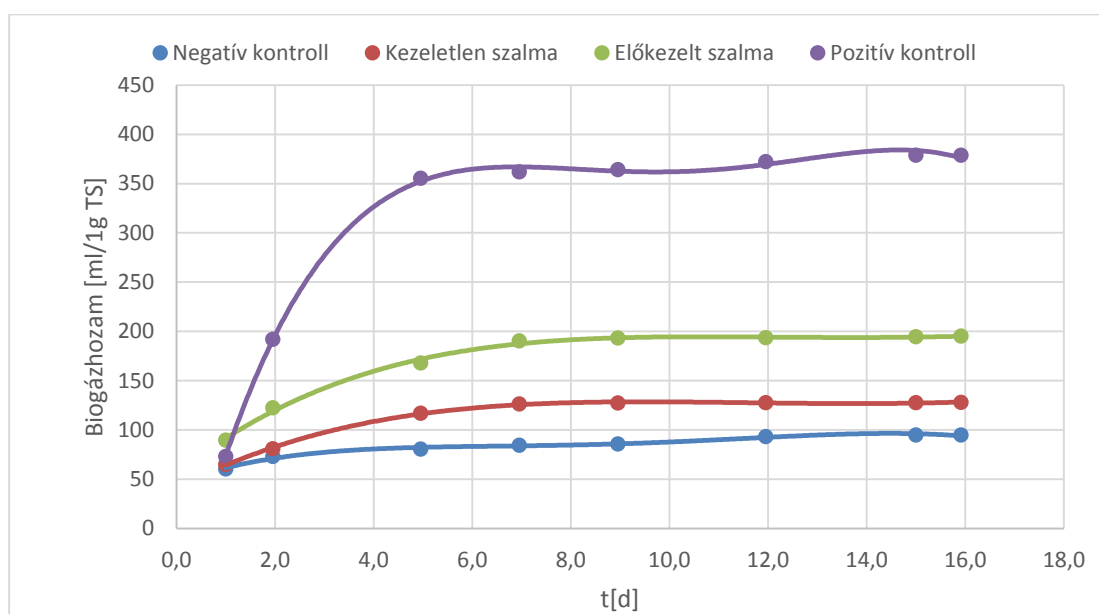
27. ábra A negatív kontrollból termelt biogáz és annak metántartalma

A kapott hozamok tényleg azt igazolják, hogy cellulóz nélkül kisebb lesz a biogáz keletkezés, illetve a metánhozam is elhanyagolható a többi mintához képest.

Ha a mért értékeket közös diagramon ábrázoljuk, látszik, hogy az előkezelt minta mennyire közelíti meg a tökéletes esetet.

13. táblázat A különböző minták biogáz hozama

Eltelt napok db	Biogáz hozam [ml/1g TS]			
	Negatív kontroll	Kezeletlen szalma	Előkezelt szalma	Pozitív kontroll
1,0	60,31	64,84	89,61	72,93
2,0	73,06	80,70	122,35	191,84
5,0	80,64	116,92	167,85	355,34
7,0	84,43	126,24	190,25	361,91
9,0	85,81	127,27	193,35	363,98
12,0	93,05	127,62	193,7	372,28
15,0	94,77	127,62	194,38	378,85
15,9	94,77	127,96	195,07	378,85

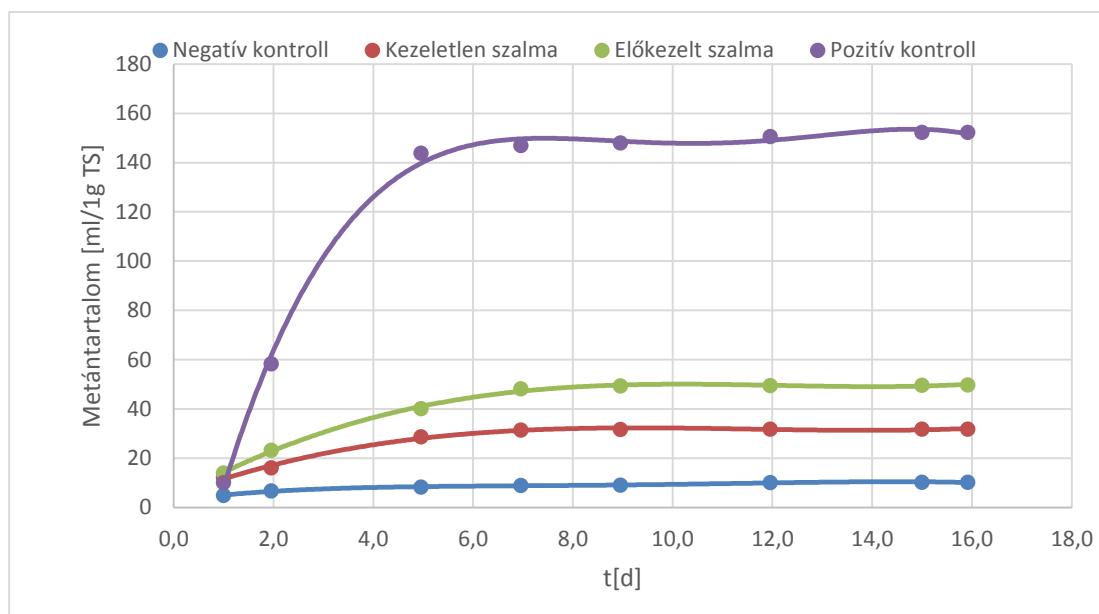


28. ábra A különböző minták biogázhozama

A diagramon látható, hogy a vártak megfelelően a különböző szalmából keletkező biogáz hozamok a negatív és a pozitív kontroll között helyezkednek el. Az előkezelt minta kétszer annyival eredményez több biogázt, mint a kezeletlen szalma a cellulóz nélküli esethez viszonyítva. Ebből látszik, hogy tényleg szükséges volt az előkezelés. A pozitív kontroll azonban sokkal magasabb biogáz hozamot eredményezett, mint a kezelt szalma.

14. táblázat A különböző mintákból keletkezett biogáz metántartalma

Eltelt napok db	Metántartalom [ml/1g TS]			
	Negatív kontroll	Kezeletlen szalma	Előkezelt szalma	Pozitív kontroll
1,0	4,88	12,16	14,03	10,035
2,0	6,77	16,03	23,2	58,29
5,0	8,23	28,69	40,13	143,85
7,0	8,89	31,44	48,22	147,01
9,0	9,10	31,71	49,31	147,93
12,0	10,04	31,78	49,42	150,62
15,0	10,24	31,78	49,61	152,23
15,9	10,24	31,84	49,8	152,23



29. ábra A különböző mintákból keletkezett biogáz metántartalma

A szalma alapanyagból készült minták metánhozama a biogáz hozamhoz hasonlóan a negatív és a pozitív kontroll hozama közé esik. Ebben az esetben az előkezelt szalma nagyjából ugyan annyival jobb a kezeletlennél, mint a biogáz keletkezés szempontjából,

itt is 50% körüli a növekedés. A maximális értéktől azonban metántartalom szempontjából is nagy az eltérés. Ezen további előkezelésekkel lehetne javítani, például vegyszer, vagy mikroorganizmus hozzáadásával.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Magyarországon a megújuló energiafelhasználás döntő hányadát a biomassa, biogáz és bioüzemanyag teszi ki és részarányuk az idő előrehaladtával folyamatosan nő [22].

Ahhoz, hogy minél nyereségesebb legyen egy biogáz üzem, nem elég a fermentációs technológia javítása, a bekerülő alapanyag tulajdonságain is sok múlik. Elsődleges szempont természetesen a meghatározott, állandó mennyiségű alapanyag rendelkezésre állása, azonban megfelelő minőségű alapanyaggal sokat lehet javítani a termelt gáz mennyiségén és minőségén.

Dolgozatomban ismertettem a különböző előkezelési módszereket és részletesen bemutattam a kavitációs kezelésben rejlő lehetőségeket. A két legnépszerűbb kavitációs eljárást – a hidrodinamikus és ultrahangos – nem csak szakirodalom alapján vizsgáltam, hanem kísérleteket is végeztem ilyen típusú berendezéseken.

Az ultrahangos készülékek vizsgálatát a Nyugat-magyarországi Egyetem, Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Karán végeztem. Először egy rezgő rudas készülék optimális munkapontját kerestem kálium-jodid szeparációján keresztül. A mérések során a kezelési időt és az intenzitást változtattam. Megállapítottam, hogy a szétválasztásra mindkét paraméter hatással van. A legkedvezőbb értéket a legnagyobb amplitúdónál és a leghosszabb kezelési időnél kaptam. Kavitációs káddal is végeztem kísérletet. Itt azonban nem tudtam a paramétereket változtatni, de megismertem ezt a típusú készüléket is.

Az Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán található hidrodinamikus berendezéssel több mérést is végeztem. Először a szeparációt vizsgáltam. A hatásfok a berendezés fordulatszámától és a tartózkodási időtől függ. Az ultrahangos eljáráshoz hasonlóan az egyre nagyobb paraméterekkel egyre jobb eredményeket értem el. Lehetőségem volt szalmával folytatott kísérletekre is. Kémiai oxigénigény méréssel vizsgáltam az előkezeléssel megfelelő méretűre darabolódott szalma mennyiségét. A legjobb eredményt a 2500 1/min fordulatszám mellett 4 percig kezelt szalma adta. Az előkezelés létjogosultságának bizonyításához az ily módon előkezelt szalmából képződő és a kezeletlen szalmából képződő biogázt hasonlítottam össze. A mért értékek alapján az előkezelés sikeresnek mondható, mivel a kezeléssel több mint 50%-kal növekedett

a termelt biogáz mennyisége és metántartalma a kezeletlen szalmából keletkezőhöz képest.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1]http://www.euvonal.hu/idex.php?op=kerdesvalasz_reszletes&kerdes_valasz_id=1472, (2013. 10.12.)
- [2] Dr. Bai Attila: *A biogáz előállítása – Jelen és jövő*, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 2005, ISBN 963-9553-39-5
- [3] Heinz Schulz – Barbara Eder: *Biogázgyártás*, CSER Kiadó, 2005, ISBN 963-7418-47-4
- [4] K.Karcz: *A biomassza hasznosítása biogáz formába*, készült a Megújuló energiaforrások kihasználása osztrák-magyar együttműködés projekt keretében, Projekt száma: AT-HU/05/01/041
- [5] Első Magyar Biogáz Kft honlapja:<http://www.biogaskft.hu> (2013.10.10.)
- [6] Sohrab Haghighi Mood, Amir Hossein Golfeshan, Meisam Tabatabaei, Gholamreza Salehi Jouzani, Gholam Hassan Najafi, Mehdi Gholami, Mehdi Ardjmand: *Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 77-93, 2013 (27)
- [7] Lara Mendez, Ahmed Mahdy, Marie Demuez, Mercedes Ballesteros, Cristina González-Fernández: *Effect of high pressure thermal pretreatment on Chlorella vulgaris biomass: Organic matter solubilisation and biochemical methane potential*, Fuel, pp.: 674-679, 2014 (117) mindegyiknél így legyen
- [8] Beszédes Sándor, László Zsuzsanna, Kertész Szabolcs, Hodúr Cecília, Kiricsi Imre, Szabó Gábor: *Mikrohullámú előkezelés hatása a tejipari szennyvíziszapok biogáztermelésére*
- [9] Mohsen Taherdanak, Hamid Zilouei: *Improving biogas production from wheat plant using alkaine pretreatment*, Fuel, pp.: 714-719, 2014 (115)
- [10] Marzieh Shafiei, Maryam M. Kabir, Hamid Zilouei, Sárvári Horváth Ilona, Keikhosro Karimi: *Techno-economical study of biogas production improved by steam explosion pretreatment*, Bioresource Technology, pp.: 53-60, 2013 (148)

- [11] Weizhang Zhong, Zhongzhi Zhang, Yijing Luo, Shanshan Sun, Wei Qiaao, Meng Xiao: *Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production*, Bioresource Technology, pp.: 11177-11182, 2011 (102)
- [12] Feng-Qin Wang, Hui Xie, Wei Chen, En-Tao Wang, Feng-Guang Du, An-Dong Song: Biological pretreatment of corn stover with ligninolytic enzyme for high efficient enzymatic hydrolysis, Bioresource Technology, pp.: 572-578, 2013 (144)
- [13] Mézes Lili: *Mezőgazdasági és élelmiszeripari biogáz-termelés optimalizálása*, Doktori disszertáció, Debrecen, 2011
- [14] Bakosné Diószegi Mónika és Dr. Horváth Miklós: *Kavitációs mező előállítása szonokémiai reakcióhoz*, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépszerkezetani és Biztonságtechnikai Intézet
- [15] Dr. Csóka Levente: *A búzaszalma ultrahangos őrlése, feltárása, fizikai és kémiai vizsgálata*, Sopron
- [16] Parag R. Gogate, Abhijeet M. Kabadi: *A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology*, Biochemical Engineering Journal, pp.: 60-72, 2009 (44)
- [17] *Spektrofotometria*, Eötvös Loránd Tudományegyetem mérési segédlet
- [18] *Titrlás II.* : Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem jegyzete Általános kémiai laboratóriumi gyakorlat (BMEVESAA209) tárgyból
- [19] *Kémiai oxigénigény meghatározása*, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar mérési segédlete
- [20] Drégely-Kiss Ágota, Horváth Miklós, Bagi Zoltán: *Biogázgyártás mérési eljárásai*, Óbudai Egyetem, 2012, ISBN 978-615-5018-51-0
- [21] *Dani Master Fast Chromatograph használati utasítás*, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar mérési segédlete
- [22] Simon Tamás: *A biomassza felhasználás jelene és jövője Magyarországon*, Magyar Energetikai Társaság honlapja, 2010, <http://www.e-met.hu/nyomtat.php?id=851>