

# Propelleres keverők alkalmazási feltételei biogázreaktorokban

Bártfai Z. – Oldal I. – Tóth L. – Szabó I. – Beke J., Szent István Egyetem, Gödöllő

Biogázüzemekben a szálás szalmát is tartalmazó szarvasmarhatrágya és kukorica-szilázs előkészítése, tovább darabolása speciális aprítóknak történik, s innen töltik az előfermentorokba. A hígtrágya, a csatornaiszap, valamint egyéb folyékony anyagok elsődleges bekeverését fűthető előtárolóban végzik. A különféle lejárt szavatossági idejű élelmiszereket és egyéb hulladékokat (konyhai hulladék, vizes mosásból származó zsíros anyagok, lesütött olajok, zsírfogóból származó zsírok stb.) fogadása a zúzóban történik. Itt a dobozolt áruknál a csomagolóanyagok aprítása és leválasztása is végbemegy, majd a híg részeket autoklávba vezetik, s legalább 4 órán keresztül 70 °C-os hőmérsékleten tartják, ezzel sterilizálják.

Profitorientált biogázüzemnél alapvető cél az állandó, előre kiszámítható villamos és hőenergia előállítás, amelynek feltétele a folyamatos, zavarmentes gáztermelés (Tóth et al 2012). Az ilyen üzemekben az időegység alatti gázkihozatalt többféle műveleti tényező csökkentheti, de főként üzemzavarok (meghibásodások, fermentorok időnkénti felhabzása stb.) okozhatják. A fermentorokba érkező anyagok nem megfelelő keverése, homogenizálása is zavaró műveleti tényező. Munkánkban a fermentorokban folytatott keverés fizikai alapkérdéseit elemeztük.

**Kulcsszavak:** biogáz, keverési igény, keverési megoldások, propelleres keverő, áramlások a fermentorban

## Keverési és homogenizálási problémák biogázüzemekben

A keverési rendszerrel szembeni követelmény, hogy:

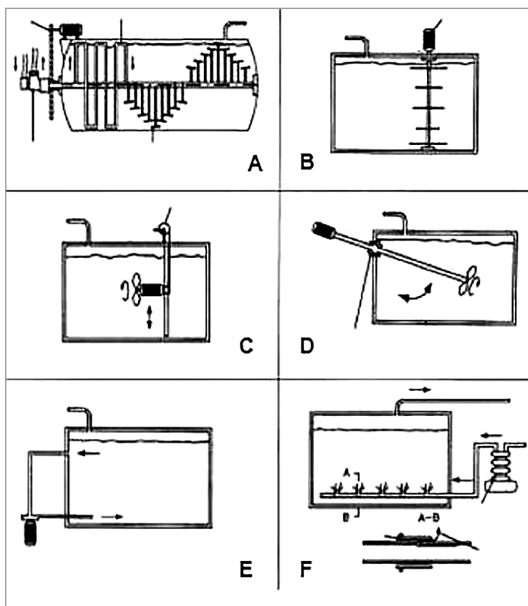
- A sűrűbb vagy hígabb anyag hozzáadagolása után is beállítható legyen a sűrűség az egész tömegre.
- Elérhető legyen az egész térfogatban az azonos hőfok és pH.
- A fűtőtestektől a hő elvihető és egalizálható legyen.
- A mikroorganizmusok kerüljenek a tápanyagokkal kényszerkapcsolatba.

- A teljes térfogat hasznosuljon, ne legyenek ún. holt terek.
- A gátló hatású anyagrészek is híguljanak fel.
- A szubsztrátum ülepedését akadályozza meg, s közben a tápanyagtartalmat is homogenizálja.
- Keverésnél az egymáshoz képest elmozduló anyagrészek ún. sebességnírása révén a baktériumoktól gáz kerül az anyagba és fel tud buborékolni a felszínre.

Biogázüzemekben végzett vizsgálatok igen nagy számban azt igazolták, hogy az er-

jesztőtartályokban a betáplált anyagok homogenizálása nem megfelelő. Az ebből fakadó hatékonyság megállapítása nem egyszerű feladat a nagyszámú erjedést befolyásoló gyakorlati paraméter miatt. Vizsgálni kell az anyagok fizikai összetételét, az aprítás mértékét, a szemcsenagyságot, a szálás anyagoknál a szálak hosszát stb.. Az értékeléshez meghatározták az anyagok kémiai összetételét, a C/N arányát, a pH-értéket, a szárazanyag-tartalmát, található-e benne gátlóanyagok stb.. Kamarad et al 2013 szerint a biogázüzemekben a bevitt energia jelentős része a keverésre fordítódik, amely függ az anyag viszkozitásától. A keverés minősége meghatározza a gázkihozatal intenzitását is. A keverésnél nyomjelzőnek hidroxid-monohidrát oldatot használtak, s különböző helyeken ellenőrizték a jelenlétét, s a mennyiségét. A módszer használhatónak bizonyult. Nagy koncentrációknál a fluidum már nem-newtoni folyadékként viselkedett. Az indikátoros módszer segítette a CFD (Computational Fluid Dynamics) modellezés helyességének elbírálását.

Számos kisminta-egység készült azzal a céllal, hogy a folyamatot modellezzék egyszerűbb, olcsóbb eljárásokkal. Ezeknek a kisminta-megoldásoknak a problémája, hogy az anyag fizikai formája a rendszerhez nehezen illeszthető, nem hozható létre a valóságot megközelítő modellanyag (M. Schön,

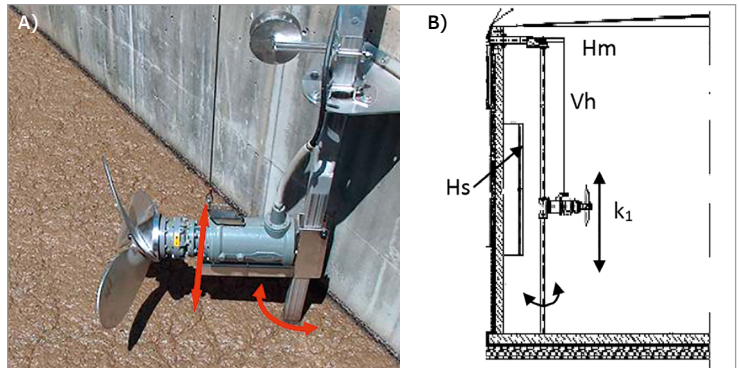


1. ábra A jellemző keverési variációk

A) Vízszintes lapátkeverő, B) Függőleges lapátkeverő, C) Állítható magasságú és irányú propelleres keverő, D) Propelleres keverő lengőkaron, E) Hidraulikus keverés, F) Légbefúvásos keverés (Schulz, 1996)

2. ábra Propelleres keverő kiviteli példája (A), a magasság változtatása és vízszintes elforgatása (B)

A – propeller, hajtómotor és felfogása, B – a mozgítás:  $k_1$  – az állítható keverő beépítése, Vh – függőleges állítás, Hm – horizontális állítás, Hs – fűtőcsövek (<http://biomassmagazine.com/>)



2009; Bridgeman, 2012). A nagyobb biztonság érdekében a folyamatokat mind kisminta-méretben, mind valóságos méretekhez igazodva szimulálják különféle szoftverek segítségével. Ezeknél a modellezéseknél is gondot jelent az anyagok viszkozitásának, valamint a frakcióképzésre való hajlamosságának pontos lekövetése, ezért számos hibát feltételeznek. A kisminta és a CFD együttesen jó arra, hogy alapvető hibákat megismerjék, pl. a keverés során keletkező holt tereket, az áramlási sebességeket stb. (Liang Yu et al 2012).

A módszerekből az energetikai felhasználásra is következtetni lehet, hiszen a különböző keverők hidraulikai ellenállása számítható, amely nem jelentéktelen energia a nagyméretű tartályok esetén.

Lényeges szempont a szilárd aprózóanyagok koptató hatásának kivédése, minimálisra csökkentése. A keverés során igen eltérően viselkednek pl. a homokszemcsék és a szálas anyagok. Mindezekért a keverők formái megoldásai igen sokfélék.

A napjainkig alkalmazott leginkább jellemző keverés megoldásokat szemlélteti az 1. ábra.

A nemzetközi irodalom megállapításait összegezve a keverési eljárás körül perspektivikusnak a propelleres keverő számíthat, hiszen a legkisebb a hidraulikai ellenállása, a felület leginkább feltapadás-mentessé tehető és a kiáramló anyag sebessége a meghajtó motorok fordulatszámával igen jelentős határok között változtatható. A gyakorlatban a változtatható helyzetű kivitelekkel találkozunk (2. ábra A és B). A tartályon belül állítható a keverők magassága és vízszintesen a folyadék szállítás iránya.

### A propelleres keverési megoldás áramlási viszonyainak elemzése és modellezése

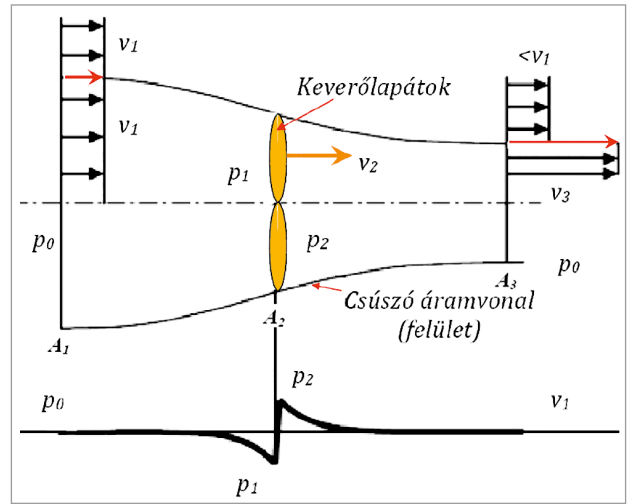
E rendszernél az áramló folyadékra felírt elvi egyenletek a következő feltevéseken alapulnak:

- az áramlás stacionárius a teljes elvi „áramcsőben”,
- a fluidum összenyomhatatlan ( $p = \text{áll.}$ ),
- a fluidum súrlódásmentes,
- a nehézségi erőterrel nem számolunk,
- az axiális sebesség az összes szelvényben állandó,
- a radiális sebesség nulla.

A kontinuitási egyenlet létrehozásának alapja a 3. ábra szerinti.

A kontinuitási egyenlet alapján tehát:  $\dot{m}\rho Av = \text{állandó}$  (tömegáram, sűrűség, keresztmetszet és a sebesség), vagyis:  $\dot{m}\rho Av = \dot{m}\rho A_2 v_2 = \dot{m}\rho A_3 v_3 = \text{áll.}$

3. ábra  
A keverőlapátok és az általuk alkotott felületen átáramló közeg határoló, szimmetrikus áramfelület „áramcső” metszetgörbéje (az ábra jeleit lásd a szövegben)



Megfelelő indexekkel az összefüggés az áramcső bármely keresztmetszetére felírható. A határ-áramvonalon (ún. csúszó áramvonal) tangenciális se-

bességugrás lehetséges. Az áramcsőbe a folyadék baloldalon lép be  $v_1$  relatív sebességgel (felfogható úgy is, hogy a keverő halad balra, és  $v_1$  sebességgel bír a nyugvó közegben). Ebben a keresztmetszetben a folyadéksebesség az „áramcső” belsejében és azon kívül is megegyezik (lásd a 3. ábrát!). Az áramcsőben a közeg a keverőlapátokhoz képest képest felgyorsul és a jobb oldalon nagyobb ( $v_3 > v_1$ ) sebességgel távozik, amíg az áramcsővön kívül a relatív sebesség végig változatlan ( $v_1$ ). A nyomás is végig állandó ( $p_0$ ), miközben a keverőtárcsán  $p_1$ -ről  $p_2$ -re növekszik, de az áramcsőből való kilépési keresztmetszetben ismét  $p_0$ .

A **tolóerő** az áramlás reakció ereje, ami a nyomáskülönbségből felírva:

$$F = (p_2 - p_1)A_2$$

A Bernoulli egyenletet felírva az áramcsőben a keverő előtt és után, majd a  $p_1$  és  $p_2$  kibontva és beírva:

$$F = \frac{\rho}{2}(v_3^2 - v_1^2)A_2 = \rho \frac{v_3 + v_1}{2}(v_3 - v_1)A_2$$

Az áramlás bármely szelvényének tömegárama a tárcsa szelvényében adott értékekkel számítható:

$$\dot{m} = A_2 v_2$$

A **hidraulikai teljesítmény** a tömegáram és az egységnyi mozgási energiaváltozás szorzata:

$$P_{hy} = \dot{m} \left( \frac{v_3^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right)$$

Az **anyagszállításra felhasznált teljesítmény** pedig a keverő előtti sebesség ( $v_1$ ) és a mozgatóerő ( $F$ ) szorzata:

$$P_{fe} = v_1 F = v_1 \dot{m} (v_3 - v_1) = v_1 \dot{m} \Delta v$$

Ezekből a hatásfok:

$$\eta_k = \frac{P_{fe}}{P_{hy}}$$

A sebességkülönbség a propellerekhez képest abban áll, hogy messze a keverő előtt a közeg áll, így a  $v_1$  sebesség zérus, ami azt is jelenti, hogy az  $A_1$  keresztmetszetnek végtelen nagyra kell lennie (vagyis az előtte lévő tér feltételezetten akadálymentes).

A hatásfok általában 50-59 % között adódik, amit az egyéb mechanikai veszteségek tovább ronthatnak.

Általában a lapátvégen áramló anyag axiális sebességének és a keverőlapát végpontja kerületi sebességének hányadosa közel azonos a lapátszög tangensével.

A folyadék rétegek párhuzamos és folyamatos áramlása esetén az elmozdulás irányával ellentétes irányú belső súrlódási erő ( $F_s$ ) egyenesen arányos a súrlódó (egymáson mozgó) felületek nagyságával ( $A_f$ ) és a sebesség-gradienssel ( $dv/dy$ ).

Az arányossági tényező nem más, mint az adott folyadék anyagi minőségére jellemző állandó, a dinamikai viszkozitás ( $\eta = Pa \cdot s$ ):

$$\eta = \frac{A_f dv_2}{F_s dy_n}$$

ahol:

$v_2$  – mozgási sebesség,

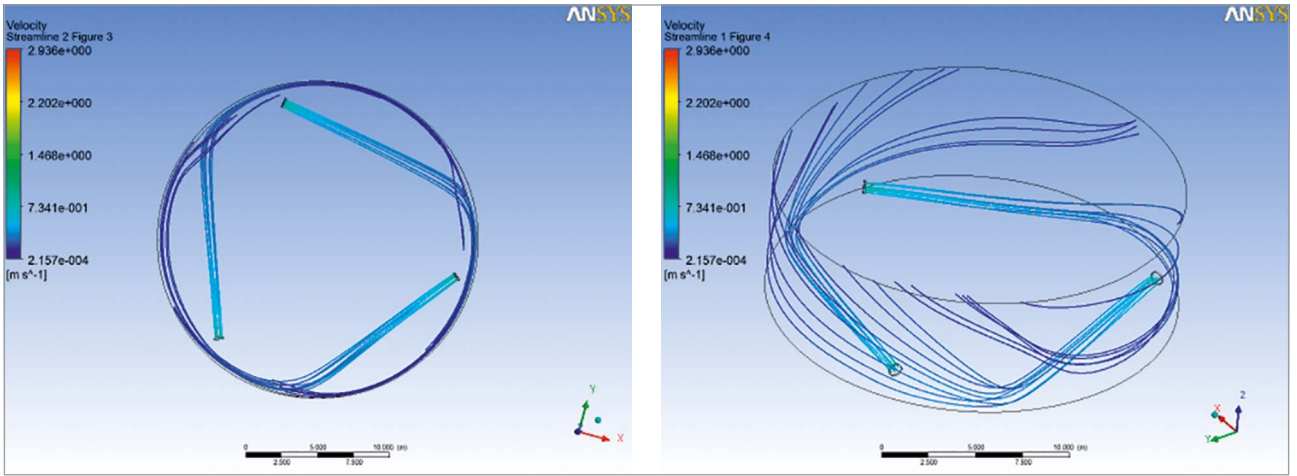
$y_n$  – folyadék réteg vastagsága

Newton-féle viszkozitási törvény szerint az egyes rétegek közötti csúsztatófeszültség egyenesen arányos a sebesség-gradienssel. Ez a nem-newtoni folyadékoknál nem egyenes arányos, tehát összetettebb formula áll fenn a csúsztatófeszültség és a sebesség-gradiens között.

A dinamikai viszkozitás ( $\eta$ ) kifejezhető a csúsztatófeszültség ( $\tau = N/m^2$ ) és a nyírási sebesség ( $\gamma$ ) hányadosával [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ , azaz Pa s]:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

Tehát a folyadékokban a dinamikai viszkozitás a csúsztatási feszültség és a sebes-



4. ábra 3 keverő a fenék közelében egyenlő magasságban elhelyezve, az áramlási irányok mindegyiknél azonosak

ség-gradiens függvénye, s mindkettő függ a hidraulikai nyomástól és az anyag mozgási sebességétől.

Ha a keverők szállítási irányra ellentétes, és a felszíntől eltérő magasságban helyezkednek el, a folyamat a függvényekkel nem írható le. Ilyenkor előnyös a modellezés, amely a kialakuló jelenségeket szemléletesen teszi (sebességek és irányeltolódások, lásd 6-8. ábrák!).

Ha a keverő a fenék közelében van, az áramlat az ütközés után felfelé irányul. A  $v_2$  értéke függ a keverő kialakításától (lapát-szög, felület simasága stb.), a tartály alakjától és méretétől, a falak keverőtől való távolságától stb..

AD átmérőjű lapátvégekről áramló anyag axiális sebességértéke általában az elméletitől eltér ( $v_2 = tg\alpha \cdot r\omega$ ), de változatlan lapát-szög ( $\alpha$ ) esetén a fordulatszám ( $n$ ) viszonylatában közel állandó, ezért a változatlan lapát-szög esetén konstans ( $a \cdot tg\alpha \sim C$ ) írhatunk (a kerületi sebességet  $\sim D \cdot n$  értéknek vesszük).

Ezzel írható, hogy a:

$$v_2 = C D n$$

Tehát jó közelítéssel a tömegáram:

$$\dot{m} = \rho A_2 v_2 = C \rho D^2 D n$$

A  $C$  értéke a Reynolds-számnál arányban van, de nagy  $Re$  értékénél a tartály méreteitől függően állandósulhat is.

A propellerből kilépő „folyadékcsugár” disszipációjára a szabad folyadékcsugárokra alkalmazottakkal írható le.

A fentebbiek figyelembevételével a modellezés alkalmas a reaktorokban a keverés áramlástani elemzésére, feltételezve, hogy a rendszer további elemét is be lehet helyettesíteni. Egy reaktorban pl. három változtatható magasságú és oldalirányban elfordítható propelleres keverővel, mindenfajta beállítást számba véve szinte végtelen sok variáció hozható létre. Ezt még fokozza, ha a fordulatszám is fokozat nélkül variálható. Ilyen nagyszámú variációs lehetőség egyértelművé teszi a modellezés és szimuláció alkalmazásának szükségességét. E két mód-

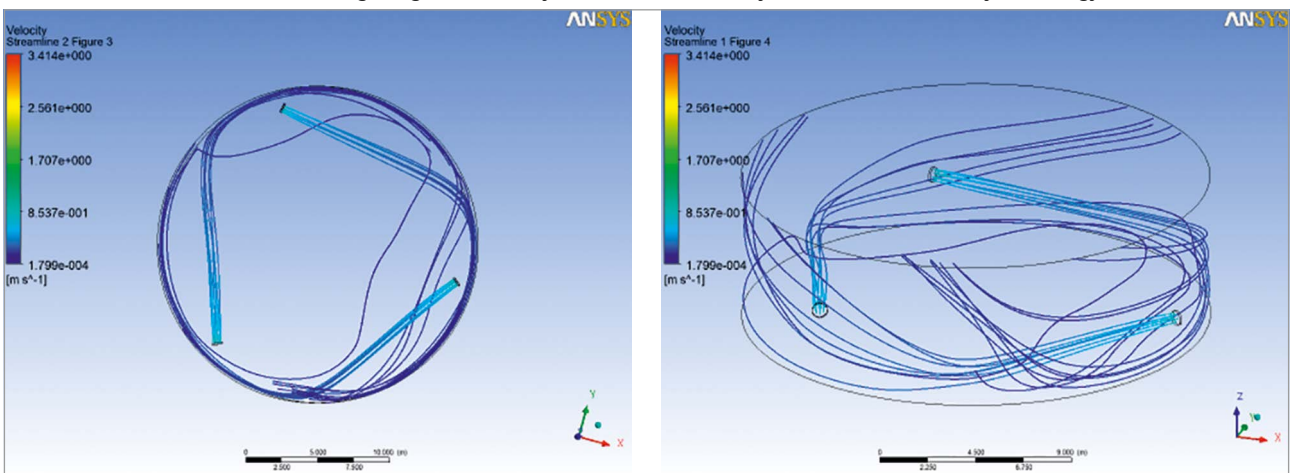
szer alkalmas lehet arra, hogy a megközelítőleg kedvezőket kiválasszuk és a leginkább megfelelőnek mutatkozókkal végezzünk validálási kísérleteket kismintákon vagy üzemelő berendezéseken. A változtatások hatására bekövetkező áramlatjellemzőket a CFD-modellek jól szemléltetik. Példaként mutatjuk a 4., 5. és 6. ábrákat.

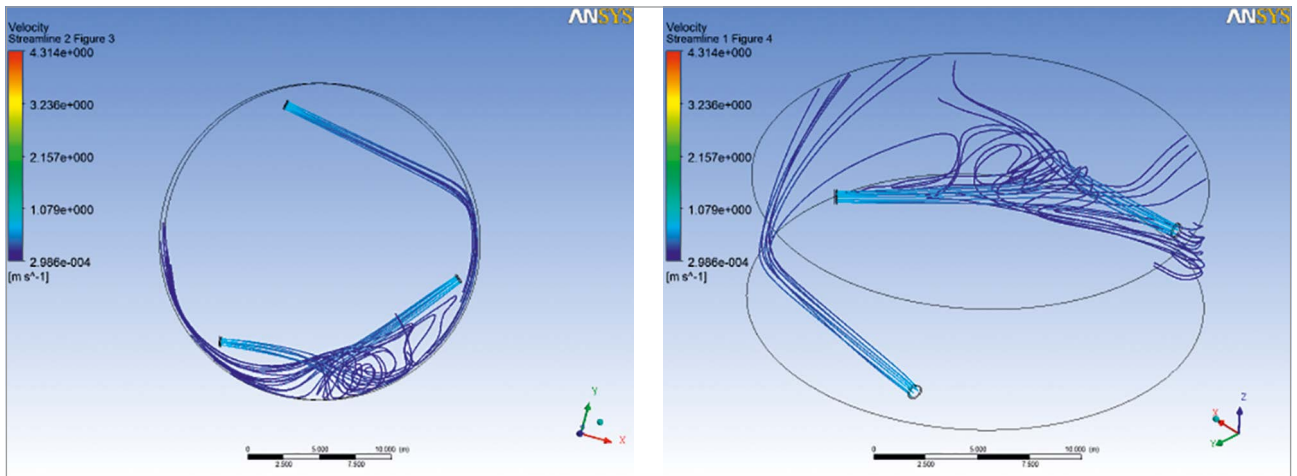
Az ábrák csak a propeller utáni bővülő áramlatot jelzi, amely csak a falat elérve bomlik szét, s mivel a keverők a fenék közelében vannak a falaknál csak felfelé irányuló szétbomló áramlat jöhet létre. A fermentorok középső része számottevő mozgást nem végez.

Ebben a modellben is a propeller után bővülő áramlat van, amely csak a falat elérve bomlik szét, de mivel két keverő a fenéktől távolabb van, a szétbomló áramok felfelé és lefelé is megfigyelhetők. Ennek következtében a falak mentén már nem kívánt turbulens elemek is megjelennek.

Az ábrákon kiragadott példák is jól szemléltetik, hogy pl. helytelen beállításokkal je-

5. ábra 3 keverő három különböző magasságban van elhelyezve a fenékhez viszonyítva, de az áramlási irányok mindegyiknél azonosak





6. ábra 3 keverő a fenék közelében egyenlő magasságban elhelyezve, kettőnél az áramlási irányok azonosak, de a harmadiknál ellenkező, ennél a kettőnél ütközés és igen intenzív turbulencia (anyagmozgás) alakul ki, viszont a falfelület 1/3 részénél nincs áramlat

lentős technológiai hibák alakulhatnak ki és romlik a gázkihozatal hatékonysága.

### Következtetések

- A fermentor-rendszer működtetésének logikájából következik, hogy az anyagbetáplálásokat követő rövid időtartamban a beérkező és a bennlévő anyagok gyorsabb hőtranszportja miatt a jelenleginél intenzívebb keverés kellene, amit a keverők fordulatszámának, azaz a szállítási tömegáram növelésével érhetünk el. Viszont a nagyobb intenzitás fenntartása hosszabb ideig nem indokolt, mert a fermentációs zónákban az anyagrézecskek között a nyírási sebesség megnövekedése a metanogén baktériumok életfeltételeit rontja.
- Az előzőn túl az intenzívebb keverés az anyagtömeg rövidebb idejű homogenizálódását is elősegíti. Az ilyen effektus elérése miatt célszerű lenne a keverőket frekvenciaváltóval ellátni, ami lehetővé tenné az optimálist megközelítő anyagmozgásokat, s az intenzív keverést is (az anyag betáplálását követően).
- A jelenlegi hőátadó felületek mellett téli időszakban a hőátvétel csak nagyobb anyagárammal érhető el.
- A keverők helytelen iránybeállítási miatt nem mozgatott tömegek is kialakulhatnak, ezért szükségszerű a modellezés alapján megállapított előnyös helyzetek validálása (pl. behelyezett hőmérőkkel).
- A keverési ciklusok időtartama, gyakorisága és intenzitása csak a gázkihozatal ellenőrzésével validálható. Mivel a keverésnél az áramlási sebesség, azaz a keverés intenzitása a keverő átmérőjével közel egyenesen arányos, a betáplálások közötti ún. nyugalmi időszakra célszerű egy nagyobb átmérőjű, de kisebb fordulátú keverőt alkalmazni, ami lényegesen nem növelné a keverési energiaigényt, viszont se-

gíti a jobb anyag-, és hőeloszlást, valamint a gáz kiáramlását az anyagból.

- A dinamikai viszkozitás növekedése miatt a keverési időszükséglet növekszik, ami többletenergia-felhasználással jár, különösen akkor, ha a szubsztrátum sok nagyobb sűrűségű szervesanyagot tartalmaz. Ebből fakadóan a csatorna-izsápnál, a szállítókiválóknál a homokleválasztók hatékonyságát javítani kell.
- A keverők működtetésének időtartama (optimuma) anyagfüggő, ezért a meghatározása csak tapasztalati úton a gázkihozatal ellenőrzésével, folyamatos monitorozással lehetséges.

### Összefoglalás

Cikkünkben áttekintettük a biogázreaktorokban alkalmazott keverőket, és elvégeztük a leginkább variálhatónak tekinthető propelleres keverő alapvető számításait, amelyek az anyagra gyakorolt kinematikai hatásokat meghatározzák. A propelleres keverés iránya, helyzete és fordulatszám, azaz szállítási teljesítmény változtatása jól megoldható, ezért a legtöbb keverővel szemben előnyösebb lehet. E kijelentést részben a modellvizsgálatok is alátámasztották, amelyekről a HAE 2015. évi 2. számában (Z. Bártfai et al 2015) számoltunk be. A propelleres keverők reaktorokon belül leginkább beállíthatók a megváltozó körülményekhez (a gyakran változó alapanyagok eltérő biológiai, kémiai és fizikai jellemzői miatt) és megközelíthetők a legkedvezőbb gázkihozatal adó elrendezések.

### Summary

During our research, we took a look on stirring systems used in biogas reactors, and conducted the calculations for the propeller stirring fan system, which is considered to be the most variable. These calculations define

the kinematic effects on the material. The direction, height and RPM – in other words, transport performance – may have to be changed in case of propeller stirring fan systems to achieve results better than any other stirring methods. This statement was supported partially by analyses made public in Issue 2, 2015 of HAE (Bártfai et al., 2015). The setups resulting in the most favourable gas yields can be adapted to the changing conditions (the mass' biological, chemical and physical attributes) the best, and are the most approachable.

Lektorálta: Dr. Patay István egyetemi tanár

A kutatást a TÁMOP 4.2.1.C-14/1/KONV-2015-0002 támogatta.

### Irodalom

- [1] L. Kamarad, S. Pohn, G. Bochmann, M. Harasek: Determination of mixing quality in Biogas plant digesters using tracer Tests and computational fluid dynamics Cfd Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis Volume LXI, 2013 140 Number 5  
<http://dx.doi.org/10.11118/actaun201361051269>
- [2] L. Tóth, J.Beke, Z. Bártfai, I. Szabó, G. Hartdében, I. Oldal, Z. Blahunka: 2014, Technological Features of Biogas Plants Using Mixed Materials, Hungarian Agricultural Engineering, N° 26/2014 39-46, Published online: HU ISSN 0864-7410 (Print) / HU ISSN 2415-9751(Online) DOI: 10.17676/HAE.2014.26.39  
<http://hae-journals.org/>
- [3] Liang Yu, Jingwei Ma, Shulin Chen: 2012 Numerical simulation of mechanical mixing in high solid anaerobic digester, Bioresource Technology, Volume 102, Issue 2, January 2011, Pages 1012–1018
- [4] [http://www.vizgep.bme.hu//BMEGEV\\_GIMOD/propeller.pdf](http://www.vizgep.bme.hu//BMEGEV_GIMOD/propeller.pdf)