

SZAKDOLGOZAT

Hujber Edvárd Ottó
Létesítményenergetikai szakmérnök

Gödöllő
2022



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Létesítményenergetikai szakmérnöki szak

**A szennyvíziszapok elgázosítással történő energetikai célú
felhasználása**

Belső konzulens: Dr. Barótfi István
Egyetemi tanár

Külső konzulens: Hujber Ottó
Műszaki igazgató,
Coopinter Kft.

Készítette: **Hujber Edvárd Ottó**
VLO4SB
Levelező tagozat

Intézet/Tanszék: **Műszaki Intézet**

Gödöllő
2022

**MŰSZAKI INTÉZET LÉTESÍTMÉNYENERGETIKA SZAKIRÁNYÚ
TOVÁBBKÉPZÉSI SZAK**

SZAKDOLGOZAT

feladatlap

Hujber Edvárd Ottó (VLO4SB)

részére

A szakdolgozat címe:

A szennyvíziszapok elgázosítással történő energetikai célú felhasználása

Feladatkiírás:

Szakdolgozatom témája a szennyvíziszapok elgázosítással történő energetikai célú felhasználásának vizsgálata. A dolgozatom fő célja az, hogy feltárjam a lakossági szennyvíziszapok okozta problémákat, továbbá meghatározzam mely eljárások alkalmasak azok hatékony energetikai célú feldolgozására. Munkám során elemzem az eljárásokat és összehasonlítást teszek köztük, hogy mely folyamat képes a legmagasabb hatásfok mellett energiát előállítani a szennyvíziszapból.

Közreműködő tanszék: Épületgépészeti és Energetikai Tanszék

Külső konzulens: *Hujber Ottó*, Coopinter Kft., 1135 Budapest, Lehel út 61.

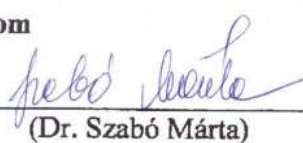
Belső konzulens: Prof. Dr. Barótfi István egyetemi tanár, MATE, Műszaki Intézet

Beadási határidő: 2023. április 30.

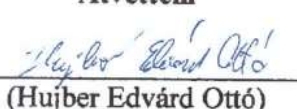
Gödöllő, 2023. április 12.

Jóváhagyom


(Dr. Schrempf Norbert Attila)

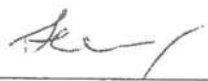

(Dr. Szabó Márta)

Átvettem


(Hujber Edvárd Ottó)

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Gödöllő, 2023. 04. hó 13. nap


(Hujber Ottó)

NYILATKOZAT

a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió¹ nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: HUJBER EDVARD OTTO
A Hallgató Neptun kódja: VLO4SB
A dolgozat címe: A SZENNYVÍZISZAPOK ELGÁZOSÍTÁSSAL TÖRTÉNŐ ENERGETIKAI CÉLÚ FELHASZNÁLÁSA
A megjelenés éve: 2023
A konzulens tanszék neve: ÉPÜLETGEPÉSZETI ÉS ENERGETIKAI TANSZÉK

Kijelentem, hogy az általam benyújtott záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió² egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, s az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a Záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemitulajdonkezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe.

Kelt: 2023 év 04 hó 28 nap

Hujber Edvard Otto
Hallgató aláírása

¹ A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

² A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

Kivonat

A szennyvíziszapok energetikai célú felhasználása számos lehetőséget rejteget magában. Ma már több olyan eljárást ismerünk, amelyek képesek ezeket a biomasszákat hasznosítani, azonban fontos tudni, hogy melyik technológia milyen eredményességgel teszi azt és milyen korlátokkal rendelkezik. A dolgozatom célja meghatározni, hogy energetikai szempontból melyek a célszerű eljárások a szennyvíziszapok feldolgozására, továbbá összehasonlítom a főbb technológiákat a címben szereplő feldolgozási módszerrel. Az elemzéshez alkalmazott fő segédeszközöm az adott technológia energia- és anyagmérlege, ebből elvégzem a szükséges energetikai és hatásfok számításokat. A kapott eredmények alapján meghatározom, hogy melyik eljárás a célszerű a szennyvíziszapok energetikai célú hasznosítására, illetve, hogy az elgázosítás milyen típusú előnyökkel és hátrányokkal rendelkezik.

Az elemzések során arra a következtetésre jutottam, hogy a biogázt előállító üzemek és az SCWG-HU eljárás képesek a leghatékonyabban feldolgozni a tárgyalt nyersanyagot. A két technológia releváns összehasonlításához az iparból beszerzett árajánlatok és specifikációk szolgáltak segítségül. Mindkét eljárás rendelkezik bizonyos előnyökkel és hátrányokkal, amiket figyelembe kell venni az elemzés során.

A biogáz üzem esetében figyelembe kell venni a magas vízigényt, a biogáz szén-dioxid tartalmát (ezáltal jelentősen rontva a hatásfokot) és a további szállítást igénylő visszamaradt rothasztott iszapot is. Pozitívum, hogy a technológia már jól kiforrott, iparban régóta alkalmazott, így a beruházási költség is mérsékelt. Az SCWG-HU eljárás még ipari szinten nem alkalmazott eljárás. Régebben még nem állt rendelkezésre megfelelő technológiai háttér egy gazdaságilag hatékony és stabil folyamat biztosítására, mára azonban ez már megoldott. A magas bekerülési költség ebből származtatható, azonban a technológia jó hatásfokot ígér, a rothasztott iszapok hasznosítására vagy akár a lakossági szennyvíziszap teljes egészének feldolgozására is képes, ezáltal a szállítási költségeket elkerülve.

A reaktorból kilépő szintézisgáz felhasználására a földgáz hálózatba integrálástól a hidrogénhajtású járművek energiaellátásán át számos lehetőség fennállhat. Összegezve, a szuperkritikus vizes elgázosítás egy kiváló lehetőség a nagy nedvességtartalmú energiaforrások felhasználására.

Abstract

The use of sewage sludges for energy purposes has many possibilities. Today we know many processes that can utilize these biomasses, but it is important to know how efficiently we do it and what limitations these technologies have. The purpose of my thesis is to determine which are the appropriate processes for processing sewage sludges from an energetic point of view, and I will also compare the main technologies with the processing method mentioned in the title. The main source of information I use for the analysis is the energy and material balance of the given technology, from which I perform the necessary energy and efficiency calculations. Based on the results obtained, I will determine which procedure is appropriate for the utilization of sewage sludges for energetic purposes, and what advantages and disadvantages gasification has.

During the analysis, I came to the conclusion that the plants producing biogas and the SCWG-HU process are able to process the discussed raw material most efficiently. Quotations and specifications obtained from the industry were used for a relevant comparison of the two technologies. Both procedures have certain advantages and disadvantages that must be taken into account during the analysis.

In the case of the biogas plant, the high water demand, the carbon dioxide content of the biogas (thereby significantly reducing the efficiency) and the remaining digested sludge that requires further transportation must also be taken into account. It is a positive thing that the technology is already well known and has been used in industry for a long time, so the investment cost is also moderate. The SCWG-HU procedure is not yet applied at the industrial level. In the past, there was no adequate technological background to ensure an economically efficient and stable process, but today this has been solved. The high initial cost can be derived from this, however, the technology promises good efficiency, it is able to process digested sludge or even the entire residential sewage sludge, thereby avoiding transportation costs.

There are many possibilities for the use of the synthesis gas obtained after leaving the reactor, from integration into the natural gas network to the energy supply of hydrogen-powered vehicles. In conclusion, supercritical water gasification is an excellent option for the use of energy sources with high moisture content.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	3
2	Szakirodalmi áttekintés	4
2.1	A szennyvíziszap keletkezése, szennyvíztelepek működése	5
2.1.1	A szennyvíziszapok csoportosítása	8
2.1.2	A szennyvíziszapok kezelési módszerei.....	9
2.2	A szuperkritikus víz és a szuperkritikus vizes technológiák.....	12
2.2.1	Az SCWG eljárás rövid ismertetése.....	14
2.2.2	Fejlesztési irányelvek	18
3	SCWG-HU és a szennyvíztelepeken alkalmazott biogáz technológia összehasonlítása .	26
3.1	Biogáz technológia bemutatása	26
3.1.1	Energia-, és anyagmérlegek	29
3.1.2	A technológia korlátai	37
3.2	Az SCWG-HU technológia bemutatása	38
3.2.1	Az eljárás lépéseinek ismertetése.....	39
3.2.2	Energia-, és anyagmérlegek	43
3.3	Főbb paraméterek összehasonlítása a két technológiában	46
4	Az SCWG-HU technológia nyújtotta lehetőségek	50
4.1	Szennyvíziszapok.....	51
4.2	Nedves biomasszák.....	52
5	Összegzés.....	54
6	Irodalomjegyzék	57
7	Mellékletek	60

1 Bevezetés

Korunk nagy kihívásai közé tartozik a fosszilis energiahordozók importjának csökkentése, a körkörös gazdaság megteremtése és a dekarbonizáció, valamint a másra nem-, vagy csak korlátozottan felhasználható megújuló energiaforrások hasznosítása.

A nap és a szélenergián túlmenően a hulladékok, azon belül is a szennyvíziszapok rendelkeznek jelentős energiatartalommal. A lakossági hulladékok egyre növekvő mennyisége folyamatosan megújuló potenciál. Ezeknek a hulladékoknak az energiahatékony, környezetbarát feldolgozása kihasználandó lehetőség és egy helyes lépés a részleges energiafüggetlenedés, valamint a körkörös gazdaság megteremtése felé.

Szakdolgozatom témája a szennyvíziszapok elgázosítással történő energetikai célú felhasználásának vizsgálata. A munkám során meg fogom állapítani, hogy éves szinten milyen összetételű és mennyiségű lakossági szennyvíziszap keletkezik, illetve, hogy jelenleg melyek a főbb felhasználási módok. A dolgozatomban meg fogom vizsgálni, hogy energetikai szempontból melyek a célszerű eljárások a szennyvíziszapok feldolgozására, továbbá össze fogom hasonlítani azokat a címben szereplő elgázosítási eljárással. Az elemzéshez alkalmazott fő eszközöm az adott technológia energia- és anyagmérlege lesz, ebből fogom elvégezni a szükséges energetikai és hatásfok számításokat. Az ebből kapott eredmények alapján meg fogom határozni, hogy melyik eljárás a célszerű a szennyvíziszapok energetikai célú hasznosítására, illetve, hogy az elgázosítás mely előnyökkel és hátrányokkal rendelkezik. A munkám végére szeretném pontosan meghatározni, hogy a lehető legkisebb káros kibocsátás mellett mely eljárás képes a leghatékonyabban hasznosítani a szennyvíziszapokban rejlő energiát.

2 Szakirodalmi áttekintés

A megújuló energiaforrások iránti kereslet napjainkban folyamatosan növekszik. Ezek közé tartoznak az olyan biomasszák, mint például a szennyvíziszap, mint nagy mennyiségben rendelkezésre álló energiaforrás. A szennyvíztisztító telepeken termelt iszap kezelése az egyik legnagyobb kihívás mind az iparosodott, mind a fejlődő országokban. Ennek oka, hogy a szennyvíztisztító telepeken keletkező iszap a feldolgozott szennyvíznek csak néhány térfogatszázalékát (általában 2-3%) teszi ki, de kezelése az összes működési költség több mint a felét képezi. A szennyvíziszapot tekinthetjük egy folyamatosan képződő energiaforrásnak. Ennek a biomasszáknak a megfelelő feldolgozása és hasznosítása lehet az egyik megoldás az egyre növekvő igények a kielégítésében. [9]

Magyarország szennyvíztisztító telepeinek a 2013. év végi biológiai terhelése összesen 8.750.148 lakosegyenérték (továbbiakban: LE). A lakosegyenérték (a szennyvíz monitorozásában és tisztításában) azon oxigénigényes anyagok mennyiségét jelenti, amelyeknek a biológiai lebomlás során történő oxigénfogyasztása megegyezik az egy személy által termelt szennyvíz átlagos oxigénigényével. A gyakorlati számításokhoz azt feltételezzük, hogy egy egység 54 gramm BOD-nak (biokémiai oxigénigény) felel meg 24 óránként. 2013-as adatok alapján hazánkban éves szinten átlagosan 20,5kg szárazanyagtartalmú (továbbiakban: sza) iszap keletkezik lakosegyenértékenként. Ha elvégezzük a számítást: $8.750.148 \text{ LE} * \frac{20,5\text{kg}_{\text{sza}}}{1000} \text{ LE. év} = 179.378 \frac{\text{t}_{\text{sza}}}{\text{év}}$ adódik. Magyarországon azonban évről évre nő a keletkező szennyvíziszap mennyisége, ezért fontos, hogy a tendenciákat pontosan határozzuk meg. Az 1. táblázat a keletkező iszapmennyiségek várható trendjét részletezi. [27; 30]

1. táblázat Iszapkeletkezés előrejelzése [27]

Év	Terhelés (LE)	Keletkező iszap (tsza/év)
2013	8 750 148	179 378
2016	10 992 712	225 351
2023	11 603 418	237 870
2027	12 214 124	250 390

A fenti táblázatban a keletkező iszap mennyiségek szárazanyagra vonatkoznak, a kezelés és hasznosítás szempontjából a Magyarországon körülbelül $1.250.000 \frac{\text{t}}{\text{év}}$ mennyiséggel kell számolni. A 2023-as iszapkeletkezési előrejelzés is erről a számról ad tanúbizonyságot. A

keletkező iszap szárazanyagtartalma 20% és nedvességtartalma 80% körül mozog. A keletkező iszap szárazanyagtartalma $237.870 \frac{t_{szá}}{év}$, ezáltal a keletkező éves mennyiség $1.189.310 \frac{t}{év}$. Így tehát a növekvő tendenciák miatt a fentebb írt általános 1.250.000 tonna elfogadható. [27, 29]

A fenti számítás szerint keletkező mennyiségű iszap villamos- és hőenergia forrásként jól felhasználható a már ismert klasszikus és a még kiforrásban lévő technológiákban egyaránt. Ezen fejlesztések célkitűzései közé tartozik az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése, a talajviszonyok javítása és a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának mérséklése a környezetünk megóvásának érdekében. [2]

2.1 A szennyvíziszap keletkezése, szennyvíztelepek működése

A szennyvíztisztító telepeket úgy tervezik és üzemeltetik, hogy csökkentsék az emberi tevékenységekből származó szennyezést; továbbá, hogy minimalizálják a környezetünk és az emberek egészségének károsodását. A szennyvíziszap tulajdonképpen a szennyvízkezelési folyamat szilárdfázisú mellékterméke. A folyadékfázis technológiai rendszerével való kölcsönhatások miatt attól leválasztható és azzal egységet képez. A szennyvíziszap több hasznosítható összetevőből és az újrahasznosítást korlátozó összetevőkből áll. A lenti, 2. táblázat a szennyvíziszap összetevőit részletezi.[26]

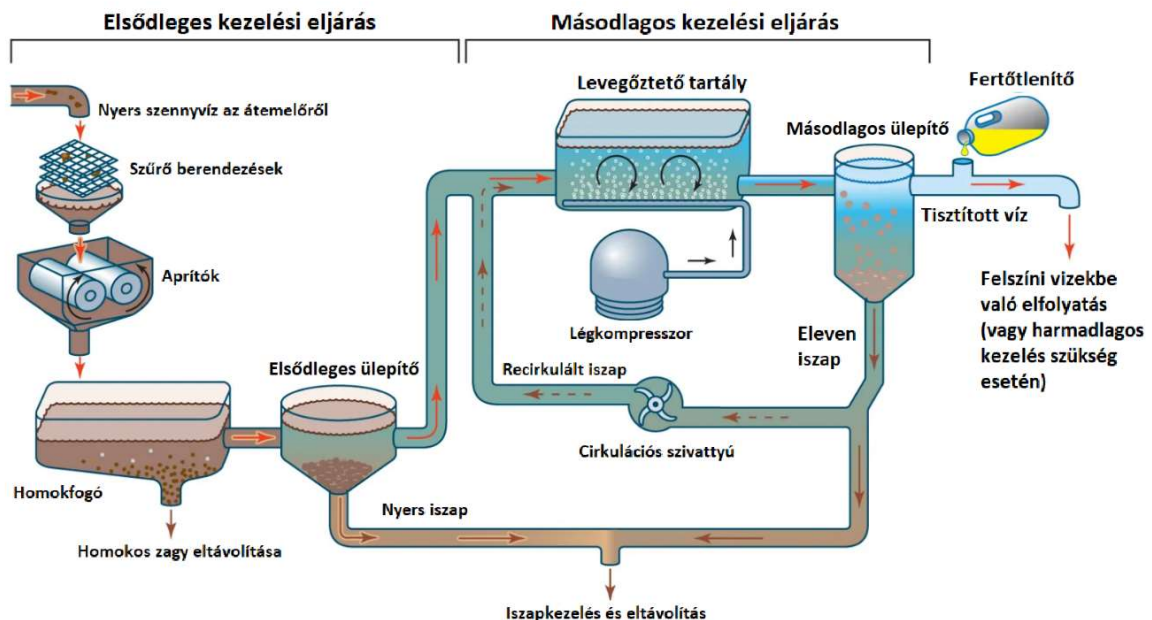
2. táblázat A szennyvíziszap hasznosítható és korlátozó összetevői [26]

Hasznosítható (I) anyagok	Iszapvíz	szabad vagy könnyen eltávolítható pórusvíz (70%)
		kapilláris víz (20%)
		pehelyrészcskék nedv. tart. (2%)
		sejtben kémiaailag kötött víz (8%)
	Aprított (őrölt) ásványi részecskék	finom és durva homok
		egyéb szemcsés anyagok
	Szerves anyag	széntartalmú maradék anyagok
	Tápanyagok	nitrogén
		foszfor
		kálium
	Nyomelemek	fémes elemek, szerves vegyi anyagok
Korlátozó (II) összetevők	Mérgező anyagok	nehézfémek (Cd, Pb, Hg, Cu, Ni, Zn,Cr)
		egyéb toxikus anyagok (pl. As, Mo)
	Patogének	baktériumok
		vírusok
		paraziták

A szennyvíziszap többek közt:

- Kritikus, biológiailag aktív keveréke a víznek,
- szerves anyagoknak (emberi hulladékokból, élelmiszer-hulladékokból stb.),
- elpusztult és élő mikroorganizmusoknak (beleértve a kórokozókat is),
- valamint szervesetlen és szerves mérgező organizmusoknak (pl. nehézfémek).

A szennyvíztelepek bizonyos mennyiségű iszapot rutinszerűen újrahasznosítanak, a kezelő létesítmény folyamatainak belüli műveletek optimalizálásának érdekében. Ahhoz azonban, hogy megértsük, pontosan hogyan keletkezik a szennyvíziszap, ismernünk kell a szennyvíztisztításnak a folyamatát. A lenti, 1. ábra ezt az eljárást mutatja be.



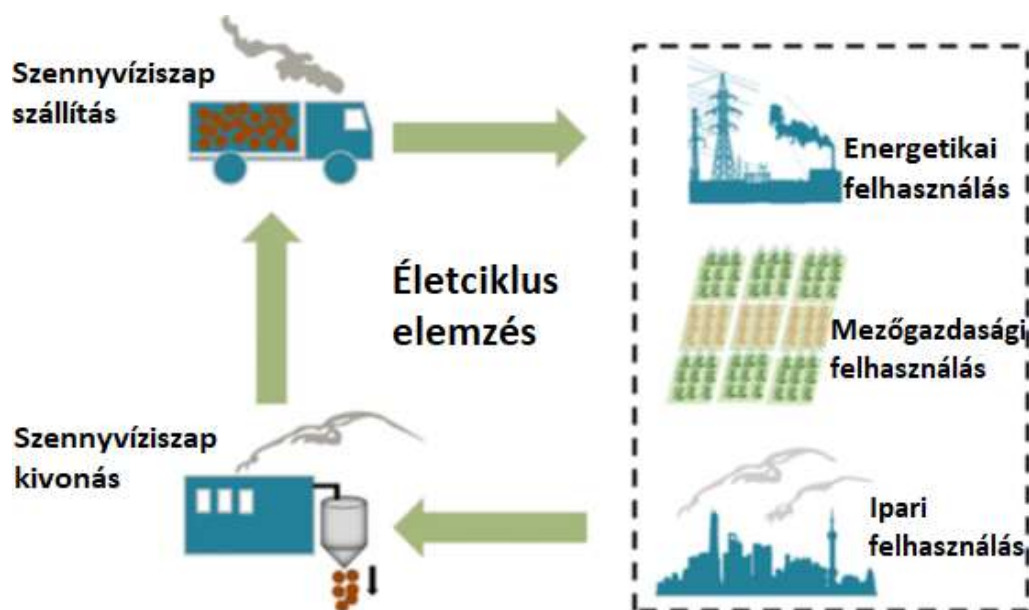
1. ábra: szennyvíztisztítás folyamata [8]

Ahogy az a fenti ábrán is látható, az elsődleges kezelési eljárás eltávolítja az olyan anyagokat, amelyek vagy lebegnek, vagy a gravitáció hatására könnyen leülepednek. Ez magában foglalja a szűrés, aprítás, szemcseeltávolítás és ülepítés fizikai folyamatait. A szűrők hosszú, egymáshoz közel elhelyezkedő keskeny fémrudakból készülnek. Elzárják a lebegő törmelék, például fát, rongyokat és más olyan nagyobb térfogatú tárgyakat, amelyek eltömíthetik a szivattyúkat. Aprítógép használható a szitán áthaladó törmelék őrlésére és aprítására. Az aprított anyagot később ülepítési vagy flotációs eljárással távolítják el. A homokfogó berendezések hosszú, keskeny tartályok, amelyeket úgy terveztek, hogy a kisebb

szemcsés anyagokat (pl. homok, kávézacc stb.) felfogja, kiülepítse a szennyvízből. A szitákon áthaladó lebegő szilárd anyagokat ülepítő tartályokban vonják ki a szennyvízből. Ezek az elsődleges tartályok az ülepítésre nagyjából két órát vesznek igénybe. Mérési tapasztalatok alapján ennyi időre van szükség az optimális ülepítéshez. A megmaradt szilárd egységek arra képes részei egy garatba összegyűlnek, ahonnan később kiszivattyúzásra kerülnek. A fennmaradó anyagokat (pl. zsírok) egy felületválasztó segítségével távolítják el. [8]

A másodlagos kezelési eljárás fő célja, hogy eltávolítsa az elsődleges folyamat után fennmaradt, oldható szerves anyagokat. Ez általában olyan eljárással történik, ahol a mikrobák a szerves szennyeződések tápanyagként elfogyasszák és azokat átalakítják a saját növekedésükhöz széndioxiddá, vízzé és egyéb anyagokká. Három fő biológiai kezelési módszert ismerünk: a csepegtető szűrős, az eleveniszapos és a levegőztetési eljárásokat. Ezeknek a szennyeződéseknek az eltávolítása segít megóvni a befogadó vizeinknek az egészségét. Éppen ezért a másodlagos ülepítés és fertőtlenítés után - amennyiben még szükséges - egy harmadik tisztítási eljárás is átesik sokszor a szennyvíz. [8]

A szennyvíztisztító telepeken a folyamatosan keletkező szennyvízből jelentős mennyiségű szennyvíziszapot kell eltávolítani és így azt közben tárolni, majd elszállítani, ami további költségekkel jár. Az anyagi sajátosságok mellett a környezeti hatásokat is figyelembe kell venni. A szerves hulladékok nem megfelelő kezelése olyan komoly károkat okozhat, mint például különböző betegségek terjedését (alsó és felső légúti fertőzés, bőrkíütés, stb.) és az üvegházhatású gázok (metán, szén-monoxid, szén-dioxid) légkörbe jutását. Mivel a szennyvíztisztító telepeken nincs elég hely az iszapkezelésre, az elhelyezés kérdése egyre súlyosabbá válik annak ellenére, hogy a szennyvíziszap a feldolgozott szennyvíz teljes mennyiségének csupán néhány százalékát teszi ki. Ennek elkerülésének érdekében olyan kezelési eljárásokat alkalmaznak, mint például a rothasztás, a víztelenítés, a termikus szárítás, az égetés és a hulladéklerakókban történő elhelyezés. [2; 3; 15]



2. ábra: A szennyvíziszap életciklusa [3]

A szennyvíziszap feldolgozásával kapcsolatos költségek a szennyvíztisztító telep teljes működési költségeinek mintegy felét képezik. A fenti, 2. ábra is jól szemlélteti, hogy a szennyvíziszap életciklusa csak akkor kezdődik igazán, amikor kivonásra került a szennyvízből. A kívánt új/korszerűsített technológiáknak és felhasználási módoknak lehetővé kell tenniük a szerves anyagok teljes újrahasznosítását és a szennyező anyagok jelenlétével kapcsolatos lehetséges kockázatok minimalizálását. [2, 3, 4]

2.1.1 A szennyvíziszapok csoportosítása

Számos paramétert vezettek be és teszteket fejlesztettek ki az iszap sajátos tulajdonságainak mérésére. Mindezt annak érdekében, hogy egyes kezelési módok esetében megfelelő módszereket tudjanak alkalmazni. Hagyományosan a szennyvíziszapok jellemzően fizikai, kémiai és biológiai paraméterek szerint csoportosíthatók. Ezekről a jellemzőkről bővebben:

- A fizikai paraméterek információval szolgálnak az iszap feldolgozhatóságáról és kezelhetőségéről. Ilyen jellemzők például a szemcseméret és eloszlás, valamint a sűrűség. Azok az iszapok, amelyek viszonylag kisméretű és kisszámú szemcséket tartalmaznak, jobb összenyomhatósággal és ülepedési képességgel rendelkeznek.
- A kémiai paraméterek a tápanyagok és a mérgező, ill. veszélyes vegyületek jelenléte szempontjából lényegesek, így többek közt a mezőgazdasági

hasznosítás esetén válnak szükségessé. Ilyen kémiai paraméterek például a száraz-és nedvesanyagtartalom, a pH érték, szerves tápanyag tartalom, fémtartalom és szennyezőanyagtartalom.

- A biológiai paraméterek segítségével megtudhatjuk milyen a mikrobiális aktivitás és a szerves anyagok/kórokozók jelenléte az anyagunkban. Napjainkban a legtöbb modern szennyvízkezelési eljárás a gyakran „eleveniszapos” elven alapul. Ez a folyamat mikrobák összetételének és működésének megfigyelésével és elemzésével foglalkozik. A mikroorganizmusok eleveniszapban betöltött szerepének meghatározása lehetővé teszi a kezelési folyamat szabályozását a szennyvíztisztító telepek teljesítményének javítása érdekében. A mikrobiális elváltozások az üzem működési körülményeinek változásaiból származhatnak, és olyan iszapminőségi gondokat okozhatnak, mint például az iszap rossz ülepitése, tömörítése és víztelenítése. [5]

A fent említettek alapján jól érzékelhető, hogy a szennyvíziszapok számos felhasználási lehetőséget rejtegetnek; a csoportosításuk, jellemzésük pedig sokrétű, komplex folyamat.

2.1.2 A szennyvíziszapok kezelési módszerei

A szennyvíziszap kezelése napjainkban egyre fontosabb kérdéssé válik. Az Európai Unió minden országában olyan irányelveket vezetnek be, amelyek alapján a tagállamoknak meg kell alkotniuk a számukra megfelelő intézkedéseket. Az uniós szabályozás szerint a tárolással járó kezelési módszereket felváltják a hulladék stabilizálását és biztonságos újrahasznosítását biztosító módszerek, jogszabályok, programok és fejlesztési stratégiák. Céljuk többek között a szennyvíziszap környezetbarát kezelésének elősegítése. Ezek a módszerek következképpen értékes nyersanyagok potenciálisan veszélyes anyagokból történő kinyeréséhez, feldolgozásához vezetnek. Az ilyen jellegű energiaforrásokat elsősorban a mezőgazdaságban, az ipar különböző ágaiban vagy a hő- és energiahasznosításban tudjuk alkalmazni. [2; 26]

A víztelenített szennyvíziszapban például az alkalmazott stabilizációs folyamattól függően elérhető szárazanyag tartalom legfeljebb 35-40%. Ez a mérték azonban csak természetes iszapvíztelenítéssel érhető el, iszapszikkasztó ágyban. Ennek a valóságban nincs létjogosultsága, mivel felettébb körülményes eljárás. A víztelenítés lefolyásához minimum 10 évre van szükség, emellett nagy helyigényű eljárás, továbbá különböző szabályozások alá

esik (pld: lakóterülettől legalább 500m-re kell, hogy legyen). Az iparban éppen ezen okokból a mesterséges víztelenítés terjedt el. Ezek közé sorolhatók a különböző centrifugák, szeparátorok, prések, vákuumos és egyéb berendezések. A ma ismert technológiákkal maximum 20%-os szárazanyagtartalom érhető el. Ennél a térfogatszázaléknál nagyobbat elérni energia- és időigényes, továbbá ha túl magas a szárazanyagtartalom, akkor romlik az elegy szivattyúzhatósága, ezáltal a további kezelése is körülményesebbé válik. Ezt a jellegű eljárást a szennyvíziszap elhelyezése, szállítása vagy további feldolgozása (pl. biogáz üzemű reaktor, égetés) előtt célszerű használni. Eljárástól függetlenül azonban minden térfogatszázalékban értékes ásványi összetevőket (szervetlen szén, nátriumot, foszfort) találunk és jelentős mennyiségű egyéb tápanyagokat, beleértve a mikrotápanyagokat is. Ezen okokból kifolyólag a szennyvíziszap teljeskörű feldolgozása és újrahasznosítása tekinthető a körforgásos gazdaság egyik hosszútávú céljának. [2, 26]

A szennyvíziszapok kezelési lehetőségei részletes iszapjellemzést igényelnek, mivel a szennyvíziszapok tulajdonságai nagy eltéréseket mutatnak a szilárd anyagok eredetétől, a lezajlott erjesztés mértékétől és a feldolgozás típusától függően. Ezekre néhány példa:

1. **Anaerob lebontás:** Ez egy olyan folyamat, amelyben a mikroorganizmusok oxigén hiányában lebontják a szerves anyagokat biogáz előállítására, amelyet elégetve villamos energiát állítanak elő. A biometanizáció során képződött biogáz nagyjából 55% metánt - amit aztán villamos- és hőenergia termelésre tudunk felhasználni -, 40% szén-dioxidot és a maradék 5%-ban olyan maradványgázokat, mint nitrogén, hidrogén, kénhidrogént és ammóniát tartalmaz. Ennek az eljárásnak a fő hátránya, hogy az így keletkező CO_2 gázok a légkörbe kerülnek szennyezőanyagként, továbbá az eljárás után visszamaradt rothasztott iszap a szervesanyag tartalmának még mintegy felét tartalmazza.
2. **Komposztálás:** Egy olyan folyamat, amelyben a szerves anyagok lebomlanak a mikroorganizmusok hatására, és biológiailag stabil, humuszszerű anyaggá alakulnak.
3. **Talajjavítás** Ez magában foglalja az iszap talajjavítóként történő felhasználását, ahol esszenciális tápanyagokkal látja el a talajt, és elősegíti a talajminőség javítását.
4. **Termikus szárítás:** Olyan endoterm folyamat, ahol hő bevitelével vizet távolítanak el az iszaptól, ami jelentősen csökkentheti a térfogatát és súlyát, emellett növelve a

szárazanyag tartalmát.

5. **Lerakás:** Ez magában foglalja az iszap elhelyezését egy erre kialakított, általában talaj fedte lerakóhelyen, ahol idővel lebomlik. A minimális itt tartózkodási ideje az iszapnak általában 10 év.
6. **Égetés:** Ez az exoterm folyamat magában foglalja az iszap elégetését annak érdekében, hogy csökkentsék a térfogatát és súlyát, és megsemmisítsék az esetlegesen jelen lévő kórokozókat/veszélyes anyagokat. Két lehetséges módja van: kizárólag iszap elégetésével való felhasználás vagy pedig egyéb anyagokkal való együtt égetés. Az égetést minden esetben megelőzi egy szárítási folyamat.
7. **Szuperkritikus vizes elgázosítás:** Ez olyan folyamat, amelyben az iszap nagyon magas hőmérsékletnek és nyomásnak van kitéve, aminek következtében az iszap gázok és szervesetlen szilárd anyagok keverékére bomlik. A 3. táblázat a különböző iszapok fűtőértékeit részletezi. A táblázatban jól megfigyelhetjük, hogy a rothasztott iszap fűtőértéke közel fele a nyers iszapénak. Az elgázosítás olyan szintézisgázok előállítását szolgálja, amelyeket energiatermelésben és kombinált termelési rendszerekben energiaforrásként hasznosítanak. A szuperkritikus vizes elgázosítás ezeknek az eljárási módoknak a jó hatásfokú formája, mivel minden keletkező gáz (30-40% metán, 8-15% szén-monoxid, 40-65% hidrogén) hasznosítható valamilyen formában. A hidrogénből metánt állíthatunk elő biológiai reaktorokban, a többletgázok (metán, szén-monoxid) elégetésével pedig kielégíthetjük a szuperkritikus vizes rendszer energiaigényét. [2; 5; 11; 26]

3. táblázat *Különböző iszap típusok fűtőértékei [26]*

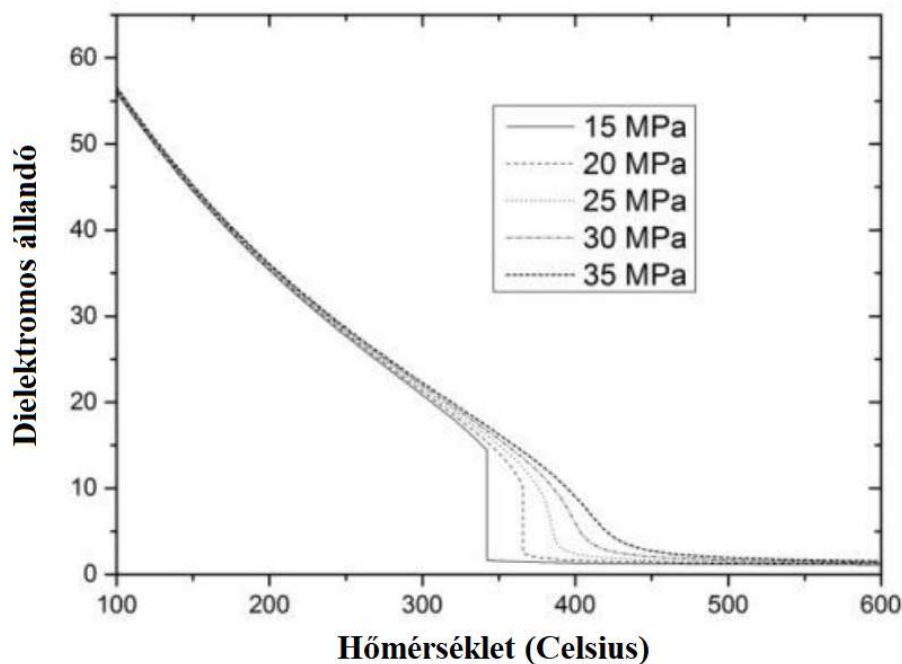
Nyers iszap	25 500 kJ/kg sz.a.
Fölös eleveniszap	20 900 kJ/kg sz.a.
Rothasztott iszap	11 600 kJ/kg sz.a.
Rothasztott kevert iszap	13 400 kJ/kg sz.a.

A fenti példák jól szemléltetik, hogy sokféle iszapkezelési módszer áll rendelkezésünkre. A mindenki számára jól ismert komposztálástól, a szuperkritikus vizes eljárásig többféleképpen feldolgozhatjuk a biomasszánkat, azonban azt is érdemes

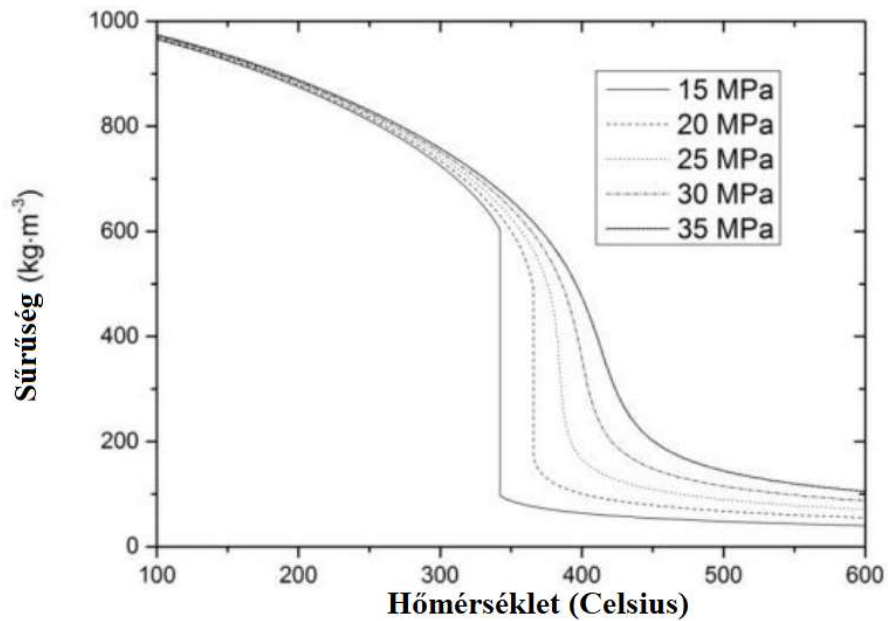
figyelembe venni, hogy ezen eljárások során mennyi energia szükséges a tényleges feldolgozáshoz, végeredményként a kinyerhető energia valóban több-e, mint a befektetett. [2]

2.2 A szuperkritikus víz és a szuperkritikus vizes technológiák

A víz sok tekintetben egyedülálló tulajdonságokkal rendelkezik, amelyek jól jellemzik általános körülmények között. Azonban a víz a kritikus, 374 Celsius fok hőmérséklet és 221 bar nyomás feletti állapotokban is létezhet, és ezt vizsgálták is. A normál vízhez képest a szuperkritikus víz (SCW) kisebb mennyiségű hidrogénkötést, alacsonyabb dielektromos állandót, kisebb viszkozitást és nagyobb diffúziós együtthatót tartalmaz. Ebben az állapotban fokozatosan összenyomható folyadékszerűből gázszerűvé válik. Az így létrejövő kisebb sűrűségű, szuperkritikus állapotok olyan figyelemre méltó tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek nagymértékben eltérnek a normál körülmények között tapasztaltaktól. Egyetlen más oldószerben sem változtathatók meg a kritikus ponthoz közeli, vagy feletti tulajdonságok a nyomás és a hőmérséklet függvényében hatékonyabban, mint a vízben. A szuperkritikus víz gőzszerű víz vagy vízszerű gőzként jellemezhető a legjobban. A 3. ábra a dielektromos állandóságnak, az 4. ábra a víz sűrűségének értékeit mutatja a hőmérséklet függvényében. [1; 12; 14; 18]

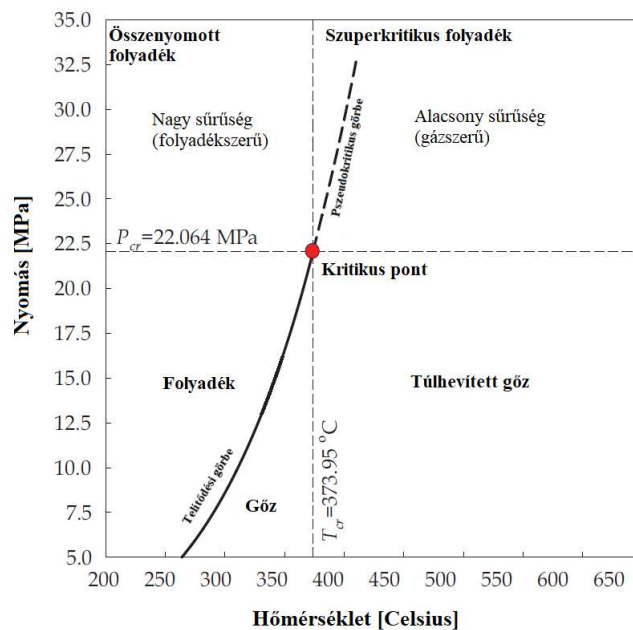


3. ábra: A víz dielektromos állandója különböző hőmérsékleteken és nyomásokon [20]



4. ábra: A víz sűrűsége különböző hőmérsékleteken és nyomásokon [20]

A víz a kritikus pontot átlépve, a szerves vegyületek kiváló oldószerévé válik, azonban a szervesetlen anyagokat többé nem oldja. Egyedülálló, hangolható fizikai-kémiai tulajdonságokkal rendelkezik. Ez a rugalmasság előnyös a hulladékkezelésben, a szerves vegyületek elgázosításában és az anyagszintézisben. A kritikus pont feletti hőmérsékleten és nyomáson a tulajdonságok fázisváltozás nélkül folyamatosan változtathatók a folyadékszerűtől a gázszerűig. Ez a folyamat a 5. ábrán is jól megfigyelhető. [12]



5. ábra: A víz nyomás-hőmérséklet diagramja [13]

Az ábra értelmezéséhez fontos, hogy ismerjük a fent szereplő jelölések és megnevezések jelentését:

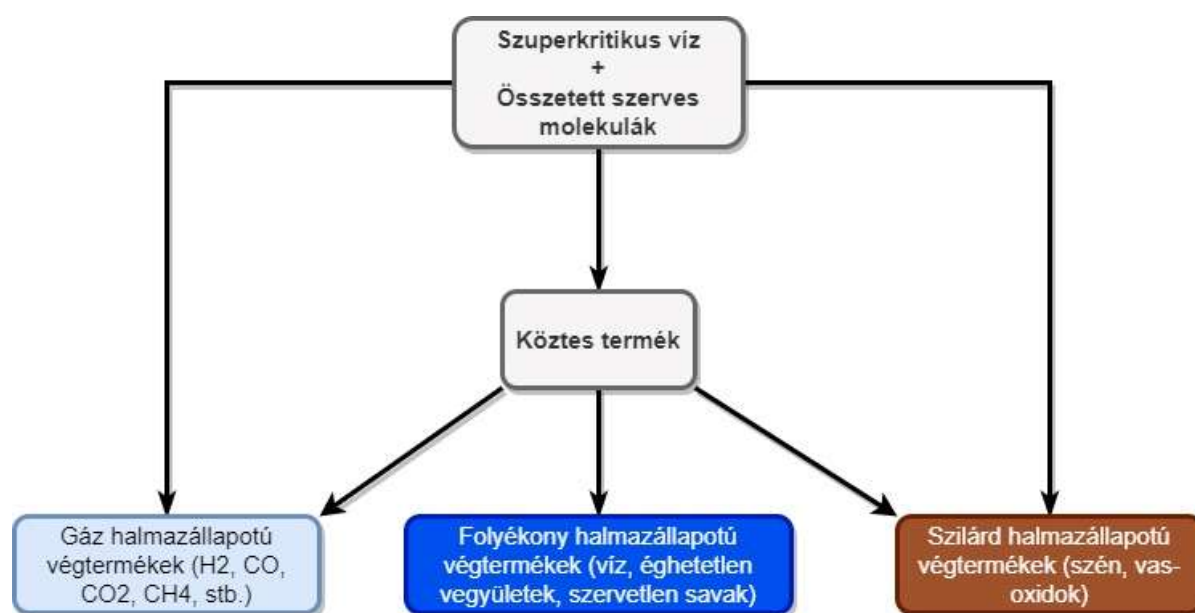
- Az **összenyomott folyadék** az olyan fluidum, amelynek nyomása meghaladja a kritikus nyomást, de hőmérséklete a kritikus hőmérséklet alatt van.
- A **kritikus pont** (más néven kritikus állapot) az a pont, ahol a folyadék és a gáz (vagy gőz) fázis közötti különbség megszűnik, azaz mindkét fázis hőmérséklete, nyomása és térfogata vagy sűrűsége megegyezik. A kritikus pontot a T_{cr} , P_{cr} és V_{cr} (vagy ρ_{cr}) fázisállapot-paraméterek jellemzik.
- A **közelkritikus pont** valójában egy keskeny tartomány a kritikus pont körül, ahol a tiszta folyadék összes termofizikai tulajdonsága gyors változást mutat.
- A **pszeudokritikus görbe** az egy olyan görbe, amely pszeudokritikus (álkritikus) pontokból áll. Az álkritikus pont (P_{pc} és T_{pc} paraméterekkel jellemezve) a kritikus nyomás feletti nyomáson és az adott nyomáson a fajhő maximális értékének megfelelő hőmérsékleten ($T_{pc} > T_{cr}$) lévő pont.
- A **szuperkritikus fluidum** olyan folyadék, amelynek nyomása és hőmérséklete magasabb, mint a kritikus nyomás és a kritikus hőmérséklet.
- A **túlhevített gőz** a kritikus nyomás alatti, de a kritikus hőmérséklet feletti hőmérsékletű gőz. [13]

Az állapotjellemzők vizsgálata kulcsfontosságú a folyadék viselkedésének megértéséhez, mivel az ilyen kísérletek lehetővé teszik a folyadék hőmérséklet, illetve térfogat függő tulajdonságainak elkülönítését. Jelentős sűrűségváltozások eléréséhez akár 25-30 MPa nyomásra is szükség lehet. Ilyen szélsőséges körülmények között a fokozott korrózióval is számolni kell a nyomástartó edényekben. Az eljárás megfelelő tervezést igényel, mely során a kiválasztott szerkezeti anyagoknak meg kell küzdeniük a magas hőmérséklet, a nagy nyomás és a nagyfokú korrózió együttes feltételeivel. [1; 14]

2.2.1 Az SCWG eljárás rövid ismertetése

A supercritical water gasification (SCWG) - avagy magyarul szuperkritikus vizes elgázosítás -, elősegíti a szerves molekulák lebomlását oxigén hiányában, redukciós

hidrotermális reakciókon keresztül. Az SCWG fő célja a hidrogén előállítása nedves biomasszából. Ez a hidrotermális folyamat megnyitja a lehetőséget a „zöld” biomassza olyan formában történő feldolgozására, ahogy van, azaz a természetes víztartalommal. A hidrotermikus gázosítás során a biomasszát nem kell nagy energiaráfordítással szárítani. Éppen ellenkezőleg, vízre van szükség az eljárásban reagensként és reakcióközegként. A szénhidrátok gyors hidrolitikus bomlása és a közbenső termékek reakcióköörülmények között való kedvező oldhatósága miatt magas gázhozam érhető el, viszonylag alacsony hőmérsékleten, mérsékelt nemkívánatos termékek (pld. kátrány és koks) képződése mellett. A fő oka annak, hogy ezt a folyamatot nagy nyomáson hajtják végre, az, hogy a víz gőzzé alakulását meggátolják. Az eljárás a hagyományos gázosítás és az anaerob lebontási folyamatoknál sokkal rövidebb reakciós idővel megy végbe; legfeljebb néhány perc. A 6. ábra egy általános reakcióhálózatot mutat be összetett szerves molekulák elgázosítására. Az SCWG folyamatából származó kívánatos szintézis anyagok közé tartoznak az olyan fűtőgázok, mint például a H_2 , CO és CH_4 . Az SCWG ígéretes technológiának tekinthető, mivel a nedves biomassza hatékony szintézisgázzá történő átalakítása után földgáz-helyettesítőként használható. [12; 16; 20]

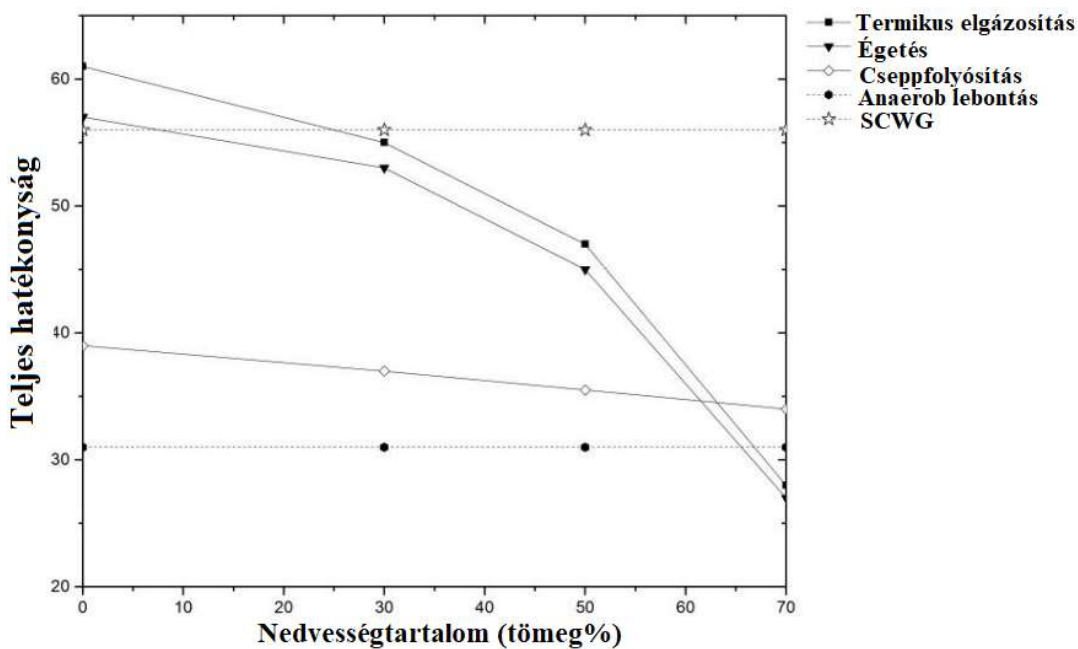


6. ábra: Összetett szerves anyagok elgázosítására alkalmazott reakcióhálózat [12]

A szuperkritikus víz ipari alkalmazásai megkövetelik a nyomással, a hőmérséklettel, a szállítási tulajdonságokkal, a vegyületek oldhatóságával és a kémiai reakciókkal kapcsolatos fizikai jelenségek megértését. A reaktoroptimalizálás magában foglalja az összetevők, az anyag, a geometria, a keverési stratégia, a műszerek, a reaktorvezérlés és a katalizátor

bevezetését a hatékony és eredményes gázosítási folyamat érdekében. [12]

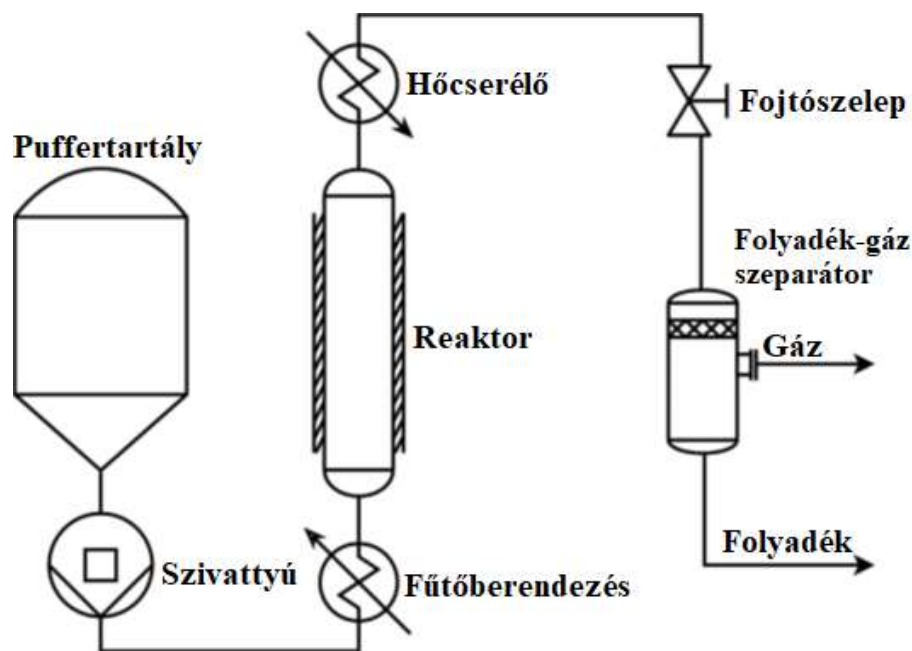
A szuperkritikus vizes elgázosítás egy endoterm kémiai folyamat, mely során hőt kell a rendszerbe bevinnünk, annak érdekében, hogy a kritikus pont fölé hevítsük a fluidumot és a reakció le tudjon játszódni. A víz hőkapacitása meglehetősen nagy, ezért sok hőre van szükség a vizes alapanyag 600°C-ra történő felmelegítéséhez. Ezért a hővisszanyerés egy SCWG üzemű folyamatos csőreaktor rendszerében létfontosságú a folyamatgazdaságosság szempontjából. Az eljárás fő célja a kinyerhető hidrogén mennyiségének maximalizálása. Egy hatékonyan megtervezett SCWG reaktor képes lehet 20%-nál több, de 40%-nál kisebb szervesanyag tartalmú szennyvíziszapból hidrogént és metánt előállítani, gazdaságilag versenyképes költségek mellett. A szárazanyag-tartalomnak mindenképpen elég magasnak kell lennie ahhoz, hogy az alapanyag energiataralma magasabb legyen, mint a feldolgozó üzem energiavesztése. A 7. ábra a szuperkritikus vizes elgázosítás (SCWG) összehasonlítását mutatja a többi biomassza-átalakítási eljárással szemben a hőhasznosítás hatékonysága alapján. [12; 14; 16; 20]



7. ábra: A hőhasznosítási folyamatok összhatékonysága a biomassza nedvességtartalmának függvényében [20]

A szuperkritikus vízben a biomassza elgázosítása szénszemleges folyamat, és nincs szükség környezetre ártalmas, veszélyes vegyszerekre. Az SCWG egyik fő előnye, hogy a nedves biomassza energiaigényes szárítási lépés nélkül könnyen gázosítható. Egyik hátránya viszont, hogy az SCWG technológia kevésbé hatékony az összetett hulladékáramok

kezelésében a kokszosodás és a sókiválás miatt, de gazdasági előnyöket ígér az üzemanyag-reformálás terén. Ezeknek a nemkívánatos anyagoknak a lerakódása a hatásfok csökkenéséhez, majd idővel a csőreaktor dugulásához vezethet. A folyamatos üzemű SCWG reaktor lényeges elemeit a 8. ábra elvi vázlatán jól megfigyelhetjük. [12; 14]



8. ábra: A szuperkritikus vizes elgázosítás elvi rajza [12]

A reakció előtt a vizet és a biomasszát nyomás alá helyezik, aztán szuperkritikus körülményekre melegítik, majd a reaktorból kifolyó folyadékot lehűtik és légköri nyomásra expandálják. A csőreaktor hossza a szennyvíziszap teljes elgázosításához szükséges idő alapján kerül meghatározásra. A célkitűzéstől függően egyes reaktorok részben eltérhetnek egymástól, a nyomás alá helyezés, a hevítés, a reakció, és a fojtás sorrendje egységes marad az összes SCWG reaktorban. [12; 14]

Összefoglalva, a szuperkritikus biomassa gázosítás a következő előnyökkel bír:

1. A nedves biomassa szárítása nem szükséges. Ezért nincs szükség a víz elpárologtatásához szükséges költségekre és energiára. A biomassa jelentős mennyiségű vizet választ szét és további hidrogén keletkezik.
2. Az éghető szintézisgázt nagy nyomáson nyerjük; a további nyomásnövelés nem fogyaszt sok energiát.
3. Lehetséges a CO_2 egyszerű szétválasztása, mivel a CO_2 sokkal jobban oldódik vízben nagy nyomáson és környezeti hőmérsékleten, mint a CH_4 és a H_2 .

4. Alkálisó tartalmú alapanyag esetén alacsony CO-tartalom érhető el a gázfázisban. A gyorsan növekvő növények biomasszája általában elég magas hamu tartalmú. Más esetekben sókat vagy hamut kell hozzáadni.

Emellett az ökológiai értékelések és az ígéretes energiahatékonyság teszi érdekessé a folyamatot. [16]

A pozitívumok mellett azonban nem feledkezhetünk meg a technológia gyengeségeiről sem:

1. A szervesetlen sók kiválása és lerakódása a csőreaktorban. A sók kiválását a reaktor geometriája és a folyadékdinamikája befolyásolja a legjobban. Az alkáli sók, például a karbonátok, általában könnyen átjutnak a csövön, a többi sók nem. A nagymértékű sókiválás idővel a csőrendszer dugulásához vezethet.
2. A csőreaktor korróziója a magas nyomású és nagy hőmérsékletű szuperkritikus víznek való kitettsége miatt.

Egy technológia műszaki alkalmazásnál fontos, hogy a működés ne álljon le külső behatások és hátráltató tényezők miatt. Annak érdekében, hogy az iparban gazdaságosan alkalmazható technológiává váljon ezeknek az akadályoknak a leküzdése elengedhetetlen. [16; 17]

2.2.2 Fejlesztési irányelvek

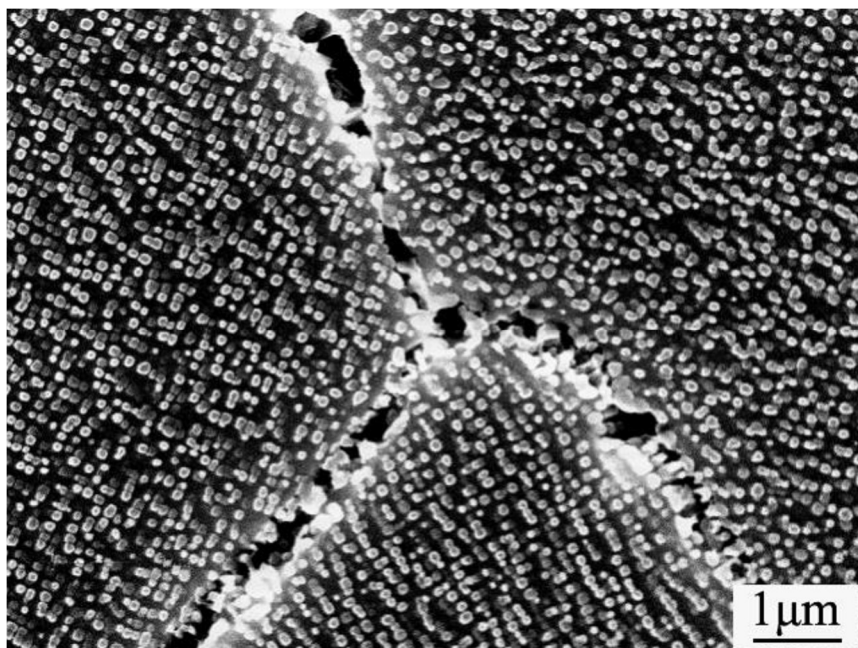
A technológia ipari méretű alkalmazását hátráltató egyik tényező a korrózió. Az elgázosítási reakció folyamat olyan szélsőséges körülmények közt zajlik, ami a csőreaktor acélszerkezetének a rozsdásodásához vezet. Ilyen befolyásoló tényezők közé tartozik például a szennyvíziszap magas oldott oxigén koncentrációja, a szélsőséges pH értékek és a magas ion-koncentráció. Emellett az elgázosítás során keletkező gázok és ásványok is korrózióhoz vezetnek. A reaktor alapjául szolgáló csőreaktor anyagát úgy szükséges megválasztani, hogy a fentebb említett tényezőket jól viselje. A bevonatolt acélok alkalmazása nem gazdaságos, mivel a reakció során a hatékony hőközlés kulcsfontosságú. Éppen ezért célszerű a magasan ötvözött acélok (titán és nikkel ötvözet) alkalmazása. Ilyen például az Alloy 625, 740 és a C-276. Ezek olyan nikkel alapú ötvözetek, amelyek a nagy szilárdság és a kúszásállóság kombinációját kínálják magas hőmérsékleten, valamint az égéshamu korrózióval szembeni ellenállását. A 2. táblázat a titán és nikkel ötvözetű acélok viselkedését mutatja be

szuperkritikus körülmények közt. [19; 21]

4. táblázat Nikkel és titán ötvözetek korrózióállósága szuperkritikus hőmérsékleten [19]

Anyag	T<T _c ; nagy sűrűségű		T>T _c ; kis sűrűségű	
	Jó ellenállás	Gyenge ellenállás	Jó ellenállás	Gyenge ellenállás
Ni alapú ötvözetek	H ₃ PO ₄ , HF, lúgos oldatok	HCl, HBr, H ₂ SO ₄ , HNO ₃	Az összes sav	[H ₃ PO ₄] > 0,1mol/kg, NaOH
Ti alapú ötvözetek	Az összes sav	F ⁻	HCl	H ₂ SO ₄ , H ₃ PO ₄

Az INCONEL által forgalmazott Alloy 740H kiváló alapanyagként szolgál a szuperkritikus vizes elgázosítás technológiájának csőreaktorához, mivel a vizsgálatok alapján 200.000 óra használat után is kevesebb, mint 2 milliméter fémvesztést garantál üzemi (700°C) körülmények között. A 9. ábra az alloy 740H mikrostruktúráját szemlélteti 5000 óra igénybevétel után. Általánosságban is elmondható, hogy a nikkel-alapú ötvözetek jó korrózióállóságot mutatnak szinte az összes savval szemben szuperkritikus körülmények között. A titán szubkritikus körülmények között alkalmazható optimálisan, pl. előmelegítő és hűtő hőcserélő szerkezeti anyagaként a reaktor előtt és után [19; 20; 21]

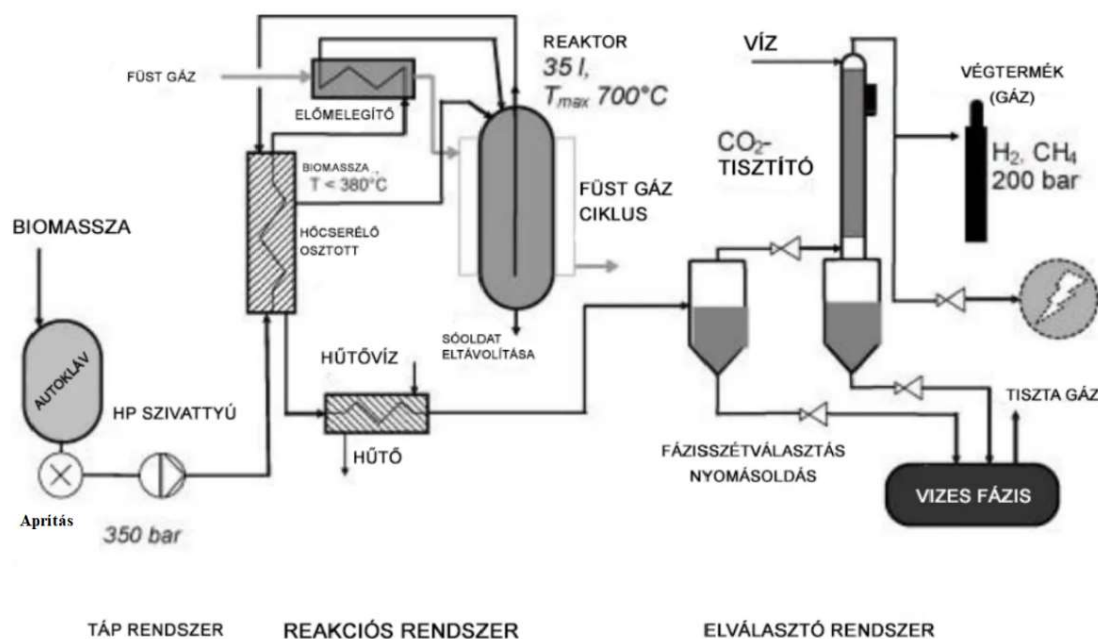


9. ábra: 740H ötvözet mikroszerkezete 5000 óra 750°C-on történő igénybevétele után. [21]

Az anyagválasztás mellett a hőmérséklet változtatásával tudjuk finomítani a technológiai folyamatunk reaktor csőrendszerére gyakorolt hatását. Ha az általános 600°C helyett 400°C-ra csökkentjük a reaktor hőmérsékletét az energiaegyensúly javítása érdekében, akkor lehetővé tesszük más típusú korróziógátló módszerek alkalmazását, mint pl. olyan bélések vagy bevonatok használatát, amelyek csökkentik a hőátadást. Az

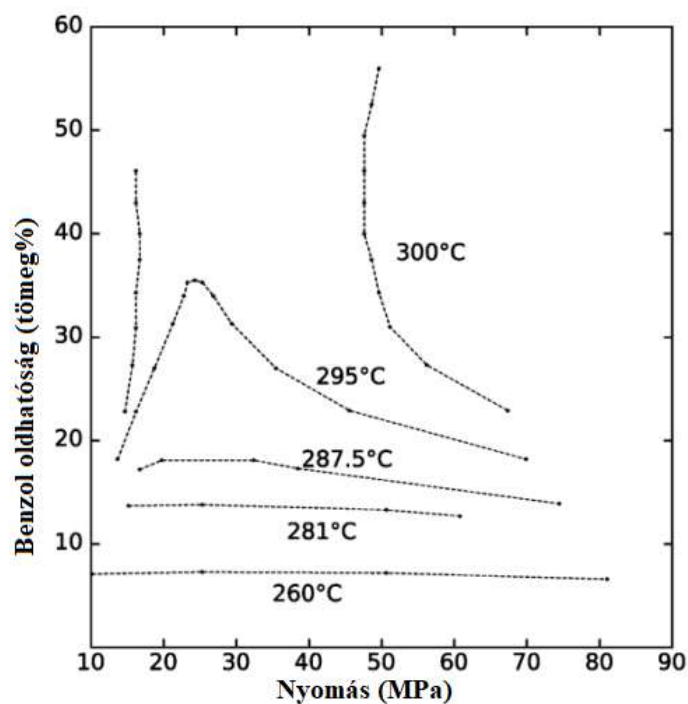
alacsonyabb hőmérséklet pozitív hatással lehet a korróziós és energiahatékonysági problémák megoldására, azonban az elgázosítás hatékonysága a lassabb reakciósebesség miatt csökken. Az ilyen gondok leküzdésének egyik módja a katalizátorok alkalmazása a reakciósebesség növelésére, ez viszont gazdaságtalanabbá teszi a folyamatot. Amellett, hogy növeli az eljárás költségeit, a katalizátorok gyakran további nehézségeket idézhetnek elő. A katalizátor felületének elszennyeződése a kicsapódott sók és egyéb ásványok által, a kokszképződés és lerakódás a katalizátor felületén a leggyakrabban fellépő kérdések közé tartoznak. A kokszképződés végeredményképpen dugulást is okozhat az áramlásos reaktorokban. [20;21]

A szennyvíziszapok szuperkritikus elgázosításának másik kihívása a folyamat megfelelő termikus hatékonyságának elérése. A hőhatékonyságnak elég magasnak kell lennie ahhoz, hogy az eljárás gazdaságilag életképes legyen az ipari alkalmazások számára. A hatásfok fontosabbá válik, ha a reaktor kívánt hőmérséklete emelkedik. A Karlsruhei Műszaki Egyetem által épített és üzemeltetett VERENA kísérleti üzem a reaktorból kilépő anyagáram magas hőmérsékletét hőcserélők segítségével az iszap betáplálás előtti előmelegítésére hasznosítja. Azonban, ha a hőcserélő fűtési sebessége nem elégséges, akkor a reakció közben koks és kátrány fog képződni. Az ilyen akadályok leküzdésére a VERENA kísérleti üzem a kritikus hőmérsékletre felmelegített koncentrált biomasszát magas hőmérsékletű tiszta vízzel keveri. A VERENA kísérleti üzem folyamatábrája a 10. ábrán látható. Ezen túlmenően, az SCWG folyamat költségei nagymértékben csökkenthetők az olyan nem hagyományos fűtési forrásokkal használatával, mint például a napenergia vagy geotermális energia. [16; 20; 22; 23]



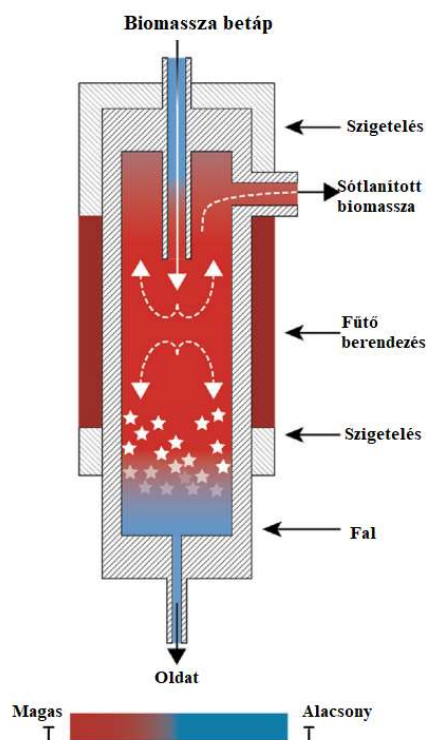
10. ábra: A VERENA kísérleti üzem folyamatabrája [22]

A biomassza folyamatok szuperkritikus elgázításának legfontosabb kihívása továbbra is a sókiválás a sók oldhatóságának gyors csökkenése miatt a szuperkritikus régióban (lásd 11. ábra). A sók a kereskedelmileg tervezett SCWG-rendszerekkel feldolgozott biomasszákból többféle okból is jelen lehetnek. Az egyik egyszerűen az, hogy a kezelendő hulladékáram részét képezik, és nehezen szétválaszthatók vagy eltávolíthatók. Az olyan szerves anyagok esetében, amelyek heteroatomokat, például klórt, ként vagy foszfort tartalmaznak, a biomassza előzetes semlegesítése bázissal, például marószerezrel egy másik sóforráshoz vezet. A kicsapódott sók eltömődési problémákat okozhatnak, ha a cső átmérője kicsi, a kristályok nagyok, heterogén katalizátorokat használnak, vagy az áramlás sebessége alacsony. Az alacsony áramlási sebesség következményeként laminárisává válik a tömegáramunk és kiülepednek a benne lévő anyagok. [20; 23]



11. ábra: A benzol oldhatósága nagynyomású vízben [20]

A sóleválasztásra többféle megoldás is létezik. Ezek közül az egyik eljárás egy olyan függőleges nyomástartó edényből áll, amelybe belesüllyesztették az előmelegített biomassza adagoló csövét. Az előhevített tápáram gyorsan elkeveredik a szuperkritikus körülmények között tartott sóleválasztó víz tartalmával. Ideális esetben a szennyvíziszapból származó sók leválnak és felhalmozódnak a sóleválasztó hidegebb alján, ahol újra feloldódnak a szubkritikus vízben, és tömény sóoldatként eltávolíthatók. A betáplált szerves frakció feloldódik a nagyobb sűrűségű forró vízben, és a sóleválasztó edény tetején lévő kimeneten keresztül a katalitikus reaktorba kerül. Ezt az eljárást a 12. ábra szemlélteti. [24]



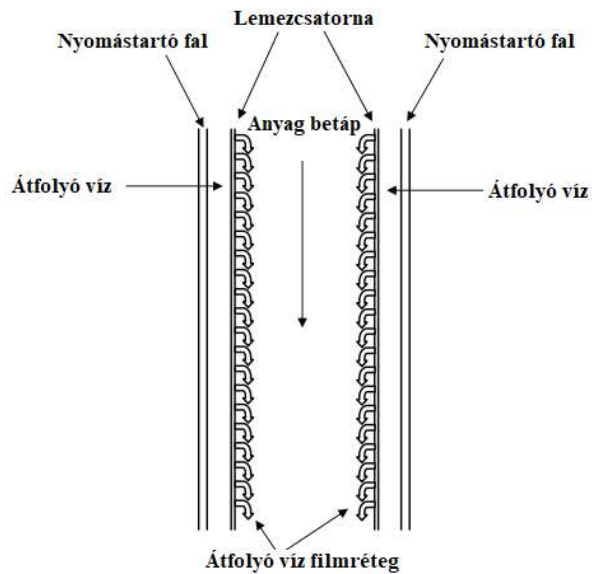
12. ábra: A sóleválasztás és kinyerés elvi vázlata [24]

Egy másik eljárás abból áll, hogy egy mechanikai tisztítást alkalmaznak a reaktor csöveinek falán a kikristályosodott sók eltávolítására. A faltisztítást rendszeres időközönként hajtják végre, gyakorisága az adott biomassza várható szilárdanyag-lerakódás sebességétől függ. Különbféle oldhatatlan szervesetlen vegyületeket és szenet tartalmazó szilárd anyagok esetében 15 perc és 20 óra közötti az előnyös falvakarási gyakoriság. A használt kefe típusa a keletkező só vagy szilárd anyagok típusától és a képződött vízkőlerakódások keménységétől is függ. A használt eszközök példái közé tartoznak a drót- vagy sörtkefék, fém- vagy gumigolyók és fém- vagy habhengerek. [25]

A sóképződés megelőzésére az iparban gyakran alkalmazott folyadék-szilárdanyag elválasztási technika a sűrűségkülönbség alapján történő szeparálás, ciklon vagy hidrociklon segítségével. A fluid-szilárd anyag keverék a ciklonba érve körkörös mozgásra kényszerül, a nagyobb sűrűségű szilárd anyag a negatív felhajtóerő hatására a ciklon aljába irányul, míg a fluid a ciklon felső részén távozik. A csőreaktor előtt, miután a hőcserélő az elegy hőmérsékletét 415-420°C-ra növelte, a szervesetlen anyagok a szuperkritikus vízből könnyen kiválnak és azokat hidrociklonnal célszerű eltávolítani. Annak érdekében, hogy a szerves anyagok ne tudjanak kiüledni fontos, hogy turbulens áramlás biztosítása mellett folytatódjon le a reakció. Ha egy folyadék sebessége kicsi, akkor lamináris (réteges) áramlásról beszélhetünk. A folyadékban az egymás mellett áramló rétegek anyaga csak a

molekuláris diffúzióval keveredik egymással. Az áramlást a Reynolds-szám segítségével definiáljuk. A Reynolds-szám egyike az áramlástan és a hőátadás számításaiban használt hasonlósági dimenziómentes számoknak. Az áramlás $Re < 2320$ esetén lamináris. Növelve a folyadék áramlási sebességét a folyadékszáll időnkénti zavarát tapasztalhatjuk, amit a további sebességnövekedéssel egyre gyakrabban tapasztalhatunk. Megvizsgálva az áramlás struktúráját megállapíthatjuk, hogy abban kisebb-nagyobb örvények keletkeznek, egymással keverednek, összeolvadnak, eltűnnek. Ezt a jelenséget turbulens áramlásnak nevezzük. Ha az áramlás zavarásoknak van kitéve, akkor az $Re \geq 2320$ számnál az átmeneti állapotba kerül, ami azt jelenti, hogy efelett az érték felett kisebb zavarások esetén is átcsaphat az áramlás turbulenssé. Az áramlás $Re > 10000$ esetén tekinthető biztosan turbulensnek. [25; 31]

Az átfolyó falú reaktor mögötti általános koncepció az, hogy oldott anyag mentes vizet vezetnek be egy porózus reaktorbélésen keresztül, annak érdekében, hogy távol tartsák a sórészecskéket és a korrozív anyagokat a reaktor falától. A hengeres bélés, amely egy cső alakú nyomástartó házba illeszkedik, sok vékony fémrétegből vagy egymáshoz kapcsolódó lemezekből áll (lásd 13. ábra). Mindegyik lemezke meghatározott bemélyedésmintával van maratva, így létrejön a csatornahálózat, amikor a lemezeket rögzítik a bélés falához. A csatornákat úgy tervezték, hogy a tiszta vizet a bélésen keresztül, a reakciókamra külső határát képező belső felületére oszlassák el. A víz a pórusokon keresztül távozik a bélés belső felületéből, és vékony, védőréteget képez a fémfelületen. A folytonos vízréteg megakadályozza, hogy a kicsapódott sók lerakódjanak a felületre azáltal, hogy a szilárd sórészecskéket magával ragadja az áramlásban és/vagy újra feloldja a sókat (ha a mosóvíz hőmérséklete szubkritikus). A tiszta víz folyamatos áramlása a falon szintén megakadályozza vagy minimálisra csökkenti a korrozív anyagok eljutását a bélés fémfelületére. [25]



13. ábra: Átfolyó falú reaktor [25]

Végül, gazdasági szempontból is fontos megvizsgálni, hogy milyen hatékonysággal képes egyes technológia az energiaforrásokat kiaknázni. Például költségoldalról a biomassa hagyományos elgázosításából származó H_2 -előállítás jelenlegi ráfordítási igénye közel háromszorosa a földgáz szuperkritikus vizes átalakításából származó H_2 -nek. Másrészt az alacsony költségű anyagok, például a szennyvíziszap használata az SCWG-eljárással csökkenti a H_2 -termelés költségét. [16]

Összegezve elmondható, hogy a hidrogén fenntartható, gazdaságos és hatékony előállítása érdekében további erőfeszítéseket kell tenni a kutatás és a rendelkezésre álló technikák fejlesztése terén.

3 SCWG-HU és a szennyvíztelepeken alkalmazott biogáz technológia összehasonlítása

Az SCWG-HU, mint hazai fejlesztésű szuperkritikus vizes elgázosításon alapuló üzem kiváló szinergiában képes dolgozni a lakossági szennyvíztelepekkel. A szennyvíztelepeken alkalmazott biogáz üzemek biogáz kinyerése után jelentős mennyiségű, energiában gazdag rothasztott iszap marad vissza, az SCWG-HU egység ezt hivatott feldolgozni. A biogáz reaktorokat nem csupán kiegészíteni, azonban - gazdaságilag versenyképes módon - helyettesíteni is képes ez az eljárás.

A következő fejezetekben a biogáz és az SCWG-HU technológiák ismertetése, összehasonlítása a fő szempont. A biogáz üzemű reaktor paramétereinek meghatározásához a Zorg Biogas GmbH által részemre kiadott minta ajánlata szolgál segítségül. Az SCWG-HU reaktor adatait Hujber Ottó, a Coopinter Kft. műszaki igazgatója által nyújtott számítások és mérések alapján dolgozom fel. Az alkalmazott eljárások energia- és anyagmérlegei alapján meghatározom azok főbb jellemzőit és az összehasonlításom során ezek a kapott információk lesznek a meghatározó elemek.

3.1 Biogáz technológia bemutatása

A biogáz jellemzően olyan gázra utal, amely a szerves anyagok oxigén hiányában történő biológiai lebomlása során keletkezik. A biogáz biogén anyagból származik. A biogázt biológiailag lebomló anyagok, például biomassza, trágya, szennyvíz, települési hulladék, zöldhulladék, növényi anyagok és energianövények anaerob lebontásával vagy fermentálásával állítják elő. Az ilyen típusú biogáz elsősorban metánból és szén-dioxidból áll. A technológia a szerves anyagok nagy molekulatömegű vegyületekből kis molekulatömegű vegyületekké történő biokémiai átalakításán alapul. Ennek a folyamatnak az első szakasza a hidrolízis. A hidrolízis során szerves savak és alkoholok keletkeznek. Szerves vegyület + $H_2O \rightarrow C_5H_7NO_2 + HCO_3$. Az ebből kapott oldott vegyületek, például szerves savak és alkoholok ($C_5H_7NO_2$; HCO_3) további átalakítása gázokká - CH_4 CO_2 $C_5H_7NO_2 + HCO_3 + H_2O \rightarrow CH_4 + CO_2 + NH_4$. A szerves vegyületek egymást követő (fázisos) átalakulásának biológiai folyamata anaerob környezetben, azaz oxigénmentes tartályban (biológiai reaktorban) megy végbe. [33]

A második szakaszban az elemi szerves vegyületek hidrolízises oxidáción keresztül jönnek létre hetero-acidogén baktériumok segítségével, acetát, szén-dioxid és hidrogén

termelésével. A szerves vegyület másik része, beleértve az acetátot is, C1 vegyületeket (elemi szerves savakat) képez. Az előállított anyagok a harmadik típusú metanogén baktériumok alapanyagai. Ez a szakasz két A és B típusú folyamatban folyik, amelyek jellegét a különböző baktériumtípusok okozzák. Ez a kétféle baktérium az első és a második szakaszban nyert vegyületet metánná, vízzé és szén-dioxiddá alakítja. A metanogén baktériumok érzékenyebbek a környezetükre, mint az acidogén baktériumok. Teljes anaerob környezetet és hosszabb szaporodási időszakot igényelnek. Az anaerob fermentáció sebessége és mértéke a baktériumok metabolikus aktivitásától függ. Éppen ezért a biogáz üzem kémiai folyamata magában foglalja a hidrolízis, az oxidáció és a metanizáció szakaszát. Az ilyen típusú szubsztrátumok esetében ezek a folyamatok ugyanabban a reaktorban zajlanak. [33]

A biogáz előállítása történhet elsődleges és másodlagos biomassza-forrásokból, vagyis a növényi fő- és melléktermékekből, valamint bármilyen természetes eredetű szerves anyagból (szerves trágya, fekália, élelmiszer-ipari melléktermékek, hulladékok, háztartási hulladékok, kommunális szennyvizek és iszapjaik) egyaránt. Biomasszából biogázt mezofil és termofil zónában történő erjesztéssel lehet nyerni.

A mezofil hőfokú rendszer jellemzői:

- 25 ± 5 napos átfutási idő,
- 35 ± 2 °C hőmérséklet,
- kórokozókban szegény,
- viszonylag egyöntetű alapanyagból, nagyobb hely- és gázfelhasználási lehetőségek esetén célszerű használni.

A termofil hőfokú rendszer jellemzői:

- 15 ± 2 napos átfutási idő,
- 56 ± 2 °C hőmérséklet,
- kórokozók fordulnak elő benne,
- gyors,
- nagy energiavesztéssel jár [32; 34]

Esetünkben vágóhídi iszapot alkalmazunk biogáz előállítására. Ezt a biomasszát biogáz üzembe szállítják, majd a pufferba töltik. A nyersanyagot csigák segítségével egyenletesen töltik be a rothasztóba a nap folyamán. A sertéstrágya és a gyomortartalom feltöltésére előtartály szolgál. A rothasztóban a szubsztrátumot $+38^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletre melegítik fel és a teljes emésztési időszak alatt állandó hőmérsékletet tartanak fenn. A rothasztó működési

rendje mezofil. Az emésztőben a felmelegített szubsztrátot rendszeres időközönként keverők keverik össze. Az átlagos feldolgozási idő a rothasztókban 25 nap. A rothasztók után a szubsztrátumot egy szivattyú táplálja a leválasztó területre, ahol szilárd és folyékony biotrágyává választják szét. A szilárd biotrágyát a leválasztó területre engedik és tárolásra szállítják; a folyékony szűrletet egy szűrlettartályba irányítják. A biogáz üzem gáztartóval van felszerelve a biogáz felhalmozására. A gáztartó időjárásálló fóliája megvédi a gáztartót a csapadéktól és az idegen tárgyak által okozott sérülésektől. Az időjárásálló fóliát egy speciális rendszer szilárdan rögzíti. A gáztartó túlnyomás elleni védelmére a rothasztók biztonsági szelepekkel vannak felszerelve, amelyek 5 mbar nyomáson kezdenek működni, és a biogázt kieresztik a légkörbe. A biogáz ezután a csővezetéken keresztül a biogáz hűtőrendszerbe (hűtőbe) kerül. A biogázt lehűtik és a kondenzátumot eltávolítják a gázból. A biogáz ezután belép a kompresszorba, ahol a nyomást 80-150 mbar-ra emelik, hogy megfeleljen a motor követelményeinek. A kompresszor után a szükséges csatlakozási pontra (előzetes kénisztisztítás után) lehet biogázt juttatni.

A kén eltávolítása kétlépcsős:

- háló és öv levegővel - a tisztítás első fokozata;
- szénoszlop - a második szakasz.

A kétlépcsős tisztításnak megvan az az előnye, hogy a kazánok és generátorok sokkal hosszabb élettartamot képesek elérni (a tiszta gáz megtakarítja a karbantartást és javítást).

Minden technológiai folyamatot automata rendszer irányít és működtet. A biogáz üzem munkáját a központi vezérlőterem monitorán figyelik. A vezérlőterem központi vezérlőegységgel van felszerelve, amely lehetővé teszi bármely biogáz üzem modul automatikus vagy kézi üzemmódba kapcsolását helyi- és távvezérléssel egyaránt. Az 1. melléklet szemlélteti az üzem általános felépítését. A következő, 14. ábrán pedig az ajánlatban szereplő biogáz üzem látható. [33]



14. ábra: Zorg GmbH által tervezett és legyártott biogáz üzem [33]

A következő pontban megvizsgálom a rendelkezésemre álló ajánlatban szereplő berendezések energiafogyasztását és a biogáz összetételét. Ez alapján kiszámítom, milyen hatásokkal és milyen beruházási költségek mellett működik az üzem.

3.1.1 Energia-, és anyagmérlegek

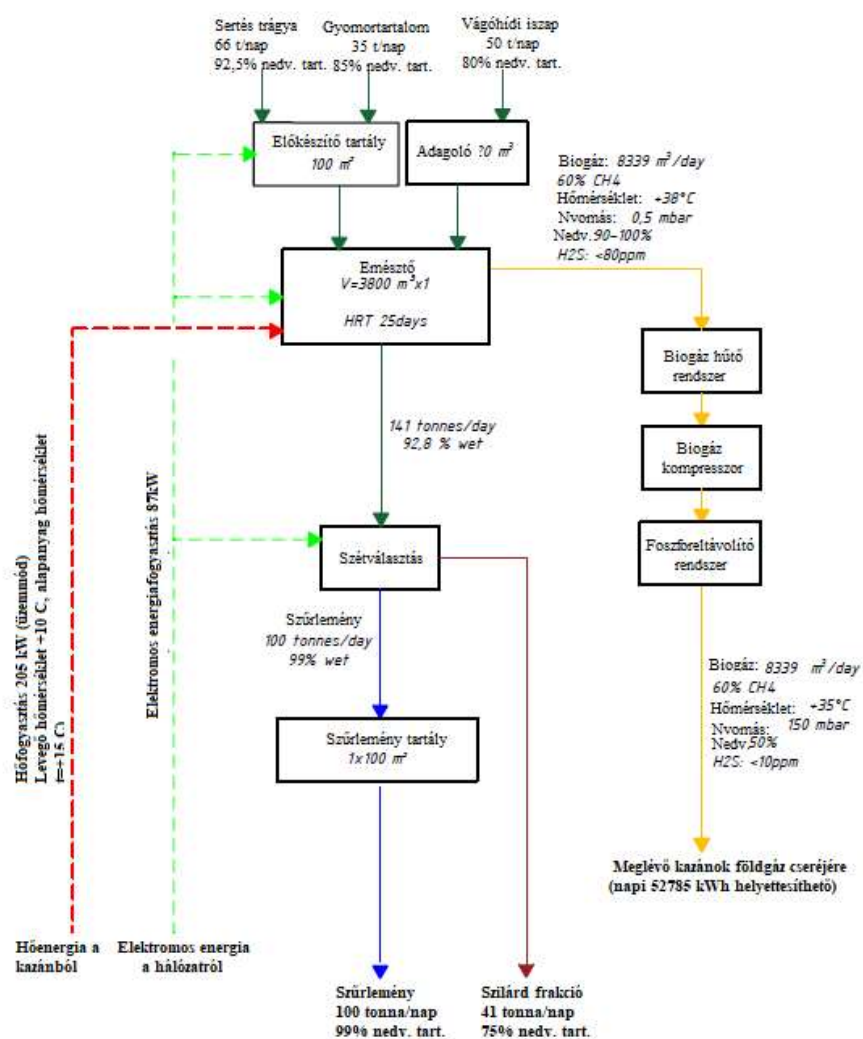
Ahhoz, hogy biogáz hozamot tudjunk számolni, fontos, hogy ismerjük a beáramló nyersanyag olyan sajátosságait, mint szárazanyagtartalom, szerves szárazanyagtartalom és biogáz hozam. A fentebb említett nyersanyagok (sertéstrágya, gyomortartalom, vágóhídi iszap) összetételét a 5. táblázat részletezi.

5. táblázat A beáramló nyersanyag szárazanyagtartalma és biogáz hozama [saját szerk.]

Szubsztrát	Mennyiség [t/nap]	Mennyiség [t/év]	Sz.a tartalom [%]	Szerve s sz.a [%]	Sz.a mennyiség [t/nap]	Szerves sz.a mennyiség [t/nap]	Biogáz hozam [m ³ /szerves sz.a*t]	Biogáz [m ³ /nap]	Metán tartalom [%]	Biogáz [m ³ /év]
Vágóhídi iszap	50	18 250	20	78	10,0	7,8	460	3 588	60	1 309 620
Sertés trágya	66	24 090	7,5	75	5,0	3,7	550	2 042	60	745 284
Gyomortartalom	35	12 775	15	86	5,25	4,5	600	2 709	60	988 785
Összesen	151	55 115			20,25	16,0		8 339		3 043 689

A táblázat értelmezése után meg tudjuk határozni, hogy pontosan hogyan néz ki az üzem anyagárama. A következő, 15. ábra ezt mutatja be.

Anyagáram táblázat



15. ábra: Biogáz üzem anyagáram táblázata [33]

A fenti ábrán szereplő sertés trágya, mint bemenő anyag, a gazdasági állatok szilárd ürülékének (bélsár), híg ürülékének (vizelet) és az alomnak különböző arányú keverékéből tevődik össze. A szilárd ürülék (bélsár) az istállótrágya legértékesebb része, amely tartalmazza mindazt, amit az állat a takarmányból nem emésztett meg, továbbá sok benne a bélbaktérium. A nitrogén-, foszfor- és a káliumvegyületeket nehezebben bomló, lassabban ható vegyületekben, tartalmazza. A híg ürülék (vizelet) azokat a végső anyagcseretermékeket tartalmazza, amelyek az állat veséjén keresztül választ ki. A kiürített vizelet tartalmazza a kálium nagy részét is. A 6. táblázat a bélsár és a vizelet napi ürítését mutatja be néhány állatfajnál.

6. táblázat Különböző állatfajok naponta ürített szilárd és híg ürülékeinek súlya [38]

Állatfaj	Bélsár (kg)	Vizelet (kg)
Szarvasmarha:	20-30	10-15
Sertés:	1,2-2,5	2,5-4,5
Juh:	1,5-2,5	0,6-1,0
Ló:	15-20	4-5

A trágya mennyiségét az alom mennyisége alapvetően befolyásolja. Habár a trágya erjedési vesztesége arányosan növekszik az alom mennyiségével, a jó trágya készítés érdekében mégis célszerű bőven almozni. A következő, 7. táblázaton azt figyelhetjük meg, hogy egyes kifejlett állatfajoknak mennyi az éves trágyatermelése. [38]

7. táblázat Kifejlett állatok napi alomszükséglete [38]

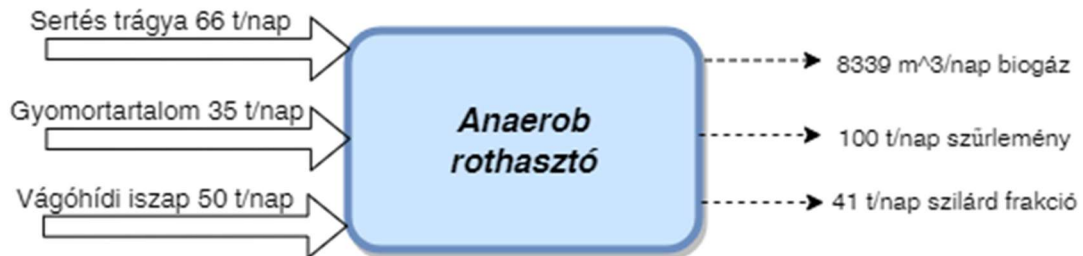
Faj és korcsoport	Trágyatermelés (t)
Szarvasmarha	
Borjú 6 hónapos korig	2,0
Növendék marha választástól 1 éves koráig	5,0
Növendék üsző 1 éves kortól 7 hónapos vemhességig	6,0
Növendék bika 2 éves koráig	9,0
Tenyészbika, tehén, 7 hónap feletti vemhes üsző:	10,0
Hízómarha	11,0
Ló	
Szopócsikó	1,5
Csikó választástól 2 éves korig	5,0
Csikó 2-4 éves korban	6,0
Kanca, mén, herélt	7,0
Juh	
Növendékjuh	0,5
Ürű	0,6
Tenyészkos, anya	0,7
Sertés	
Süldő	0,8
Kan, koca, előhasi koca	1,2
Hízósertés	1,3
Baromfi	
Liba	0,011
Kacsa	0,008
Tyúk	0,005

Esetünkben, amennyiben a hízósertés értékét vesszük figyelembe, akkor a napi 66 tonna bemenő anyag előállításához közel 17.000 sertésre van szükség. A számítás a következő:

$$\frac{8000 \frac{h}{év}}{24} * 66 \frac{t}{nap} = 22.000 \frac{t}{év} \text{ szükséglet} \quad (1)$$

$$\frac{22.000 \frac{t}{év}}{1,3 \frac{t}{év}} = 16.923 \text{ sertés} \quad (2)$$

A számítások alapján kijelenthetjük, hogy egy ekkora méretű biogáz üzem megfelelő kiszolgálásához olyan földrajzi helyet szükséges választani, ahol a közelben megtalálható több sertéstelep, illetve az állatokat feldolgozó húsüzemek.



16. ábra: Biogáz üzem anyagmérlege [saját szerk.]

A 16. ábra egy egyszerűsített anyagáram diagramot szemléltet. Az anyagáram táblázatokból láthatjuk, hogy az adott tervek szerinti napi 66 tonna sertéstrágya, napi 35 tonna gyomortartalom és napi 50 tonna vágóhídi iszaptól 8.339 m³ biogáz termelhető meg. A keletkező gázok mintegy 60%-a (5.003,4 m³) metán, amit felhasználhatunk tüzelőanyagként, vagy akár földgáz helyettesítésére is, tisztítás után a rendszerbe betáplálva. A maradék 40% (3.335,6 m³) az CO₂, ami légköri terhelésként kibocsátásra kerül. A metán fűtőértéke 50 $\frac{MJ}{kg}$. A bevitt nyersanyag fűtőértékének a számítása a következő:

$$0,6 * 8339m^3 * 0,7 \frac{kg}{m^3} * 50 \frac{MJ}{kg} = 175.119 MJ \quad (3)$$

$$\frac{175.119}{(66+35+50)} = 1.159 \frac{MJ}{t} \quad (4)$$

A rothasztóból kikerül továbbá 100 $\frac{t}{nap}$ 99% nedvességtartalmú szűrlemény és 41 $\frac{t}{nap}$ 75% nedvességtartalmú szilárd frakció is, ami még jelentős energiatartalommal bír (lásd 3. táblázat). A megtermelt biogáz tömegének és energiatartalmának számítása a következő:

$$Tömege: 5.003,4m^3 * 0,714 \frac{kg}{m^3} + 3.335,6 m^3 * 1,98 \frac{kg}{m^3} = 10.176 kg \quad (5)$$

$$Energiatartalma: 8.339 \frac{m^3}{nap} * 0,6 * 10,55 \frac{kWh}{m^3} = 52.785 \frac{kWh}{nap} \quad (6)$$

Az elgázosítás hatásfoka:

$$\frac{52.785}{175.119} = 30,14\% \quad (7)$$

Az eddigi számítások alapján meghatározhatjuk a helyettesíthető fűtési energia és

földgáz napi és éves adatait is. A számításhoz 8.000 óra rendelkezésreállással fogok kalkulálni. A következő, 8. táblázat ezt fogja szemléltetni [33]

8. táblázat Keletkező napi és éves biogáz mennyiségek megtakarítási lehetőségei [saját szerk.]

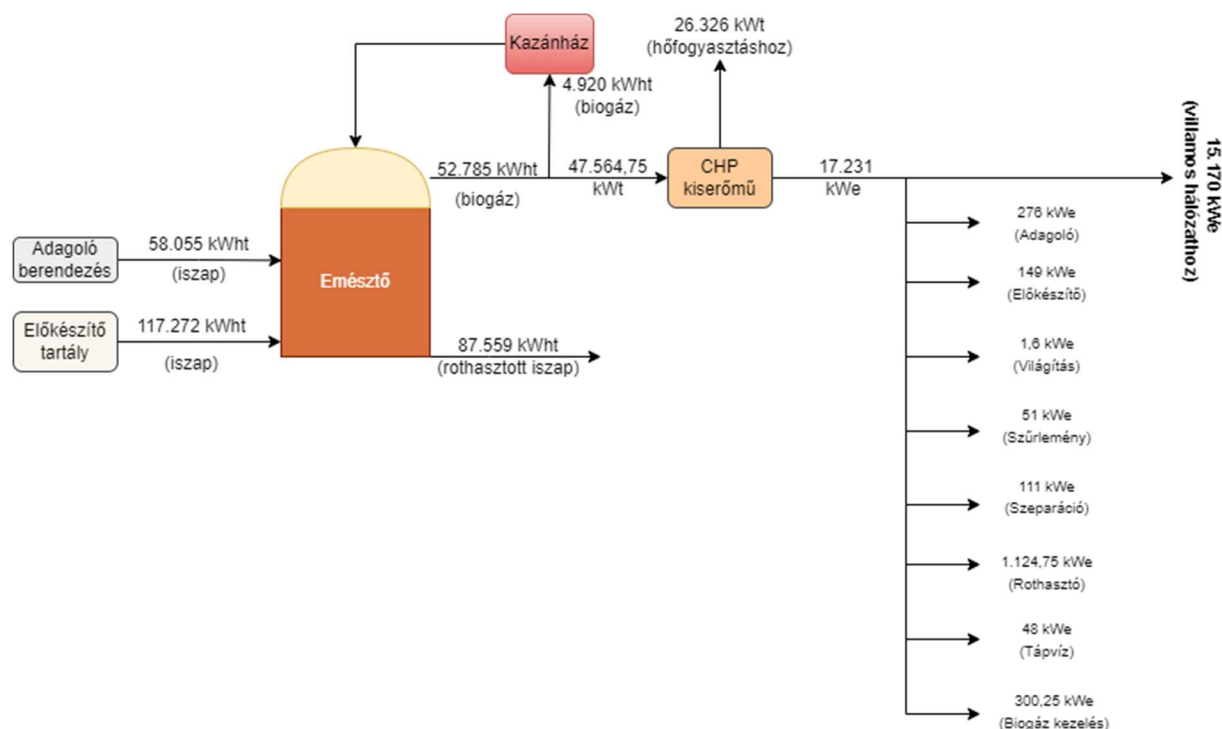
Indikátor	Napi mennyiség	Éves mennyiség
Biogáz 60%-os metántartalommal [m ³]	8 339	277 966
Potenciális fűtési értéke a biogáznak [kWh]	52 785	17 595 000
Helyettesíthető földgázmennyiség [m ³]	5 003	1 667 666

A megtermelt energiamennyiség mellett a másik tényező, amit elengedhetetlen ismerünk, az a villamos és hőenergia önfogyasztás mértéke. A 9. táblázat a biogáz üzembe beépítésre került villamos berendezések összes fogyasztását részletezi a teljesítmény függvényében.

9. táblázat A beépített berendezések teljesítményei és fogyasztásai [33]

Berendezés megnevezése	Beépített teljesítmény [kW]	Mennyiség [db]	Teljes teljesítmény [kW]	Napi üzemidő [h]	Fogyasztás [kWh/nap]
Adagoló	23	1	23	6	138
Csiga	23	1	23	6	138
Ferde keverő az előtartályban	15	1	15	5	75
Szubsztrát szivattyú	18,5	1	18,5	4	74
Merülő keverő a szűrlemény tartályban	9	1	9	2	18
Emésztő ferde keverője	15	4	60	18	1.080
Biogáz kompresszor	3	1	3	24	72
Biogáz hűtőrendszer	9,5	1	9,5	24	228
Szeperator	7,5	1	7,5	6	45
Szubsztrát szivattyú a szeperatorhoz	18,5	1	18,5	6	111
Szűrlemény szivattyú	5,5	1	5,5	6	33
Emésztő keringető szivattyúja	0,8	1	0,8	24	19,2
Keringető szivattyú tápvíz hálózat a mellékgenerátornál	2	1	2	24	48
Légkompresszor a gáztartóhoz	1,5	1	1,5	1	1,5
Légfűvő dupla membránhoz	1	1	1	24	24
Propilénlikol szivattyúállomás	0,5	1	0,5	0,5	0,25
A biogáz üzem területének világítása	0,2	1	0,2	8	1,6
Spotlámpa rothasztókhoz ellenőrző ablakok	0,1	1	0,1	0,5	0,05
Teljes beépített teljesítmény [kW]			198,6		
Összes fogyasztott elektromos energia [kWh/nap]					2.062
Átlagos villamos teljesítmény [kW]					87,775

A következő ábrán a biogáz üzem energiamérlege látható.



17. ábra: Biogáz üzem energiamérlege [saját szerk.]

A fent már összegyűjtött adatok alapján pontosan ki tudjuk értékelni, hogy bemenetből milyen nettó hatásfokkal állítjuk elő a kívánt gázunkat, vagyis a metánt. A következőkben a számításaimat a fent kinyerhető adatokkal fogom igazolni.

A biogáz erőművek energetikai hatásfokát és egyben környezeti hatását két fő tényező határozza meg. Az egyik az, amely szerint a feldolgozandó szervesanyagoknak csak mintegy 50%-ból keletkezik biogáz, az energia többi része a rothasztott iszapban marad. A másik tényező az, hogy a metanizáló baktériumok működésének eredményeképpen, a biogáz ___z mintegy 60%-a metán, a többi 40% pedig széndioxid. Ebből arra a következtetésre lehet jutni, hogy metán csupán a bevitt szervesanyag 30%-ból keletkezik:

$$50\% * ((100 - 40) * 50) = 30\% \quad (8)$$

Az elektromos energiafogyasztás mellett a technológia hőigénye a másik fontos tényező. Ahhoz, hogy a metanizáló baktériumok optimálisan tudjanak működni az üzemnek előírt 38°C-ot állandóan tartania kell, ezt a fűtőberendezések szolgáltatják. A fűtőberendezések közé tartoznak a keringető szivattyúk, hőcserélő, fűtési elosztó és csövek. A kazánból származó hő hőcserélővel továbbítják a biogáz üzembe, majd keringető szivattyúk segítségével átszivattyúzzák a biogáz üzemben. A hőhordozó etilén-glikol adalékkal vizet készít. A fűtővíz bemenő hőmérséklete 60°C, a kimeneté pedig 40°C. Az emésztő fűtésére

üzemi állapotban 205 kW fűtési teljesítményt használunk fel. Ez kiszámítva:

$$205\text{kW} * 24\text{h} = 4.920\text{kWh} \quad (9)$$

A termelt hőenergiának ez 9,32%-a.

$$\frac{4.920}{26.326} * 100 = 18,68\% \quad (10)$$

Figyelembe kell venni továbbá a visszamaradó rothasztott iszap elszállításának és lerakásának energiafelhasználását is.

Az eddigi gyártási tapasztalatok alapján a biogáz hasznosítható energiatartalma a bevitt energia mennyiségének mindössze 27%-a:

$$\frac{52.785 - 4.920}{175.119} = 27,12\% \quad (11)$$

A biogázból amennyiben villamos energiát akarunk előállítani gázmotor-generátor segítségével, akkor annak a nettó villamos hatásfoka 36%, míg termikus hatásfoka 55% körül mozog a 40%-os CO₂ tartalom miatt. Ha a fentebb felsorolt százalékokkal elvégzem a számítást:

$$36\% * 47.865 = 17.231 \text{ kWh bruttó villamos energia} \quad (12)$$

$$\frac{17.231}{175.119} = 9,83\% \quad (13)$$

9,83% a biogáz üzemünk bruttó villamos hatásfoka. A nettó hatásfok számításához fontos, hogy figyelembe vegyük a rendszer önfogyasztását is. A 7. táblázatban láthatjuk, hogy az üzem berendezéseinek teljes napi fogyasztása 2.062 kWh, így ebből következik:

$$17.231 - 2.062 = 15.169 \text{ kWh nettó villamos energia} \quad (14)$$

$$\frac{15.169}{175.119} = 8,66\% \quad (15)$$

Az üzemünk nettó villamos hatásfoka 8,66%. Ez a szakirodalmak alapján egy jó hatásfokú üzemnek minősül, mivel átlagosan a biogáz üzemek nettó villamos hatásfoka 7% és 9% között mozog. [28; 32; 33; 34]

A nettó villamos hatásfok meghatározása után számítsuk ki a gázmotorból kilépő termikus energia mennyiségét:

$$47.865 * 0,55 = 26.326 \text{ kWh}_t \quad (16)$$

A kapott érték nettó, mivel a kazánház veszteségével már korábban korrigáltuk az energiamennyiségeket. Így a termikus hatásfok a következő:

$$\frac{26.326}{175.119} = 15,03\% \quad (17)$$

Ezáltal a biogáz üzemünk összzhatásfoka:

$$8,66\% + 15,03\% = \mathbf{23,69\%} \quad (18)$$

Az előállított biogáz mennyisége mellett fontos, hogy ismerjük az előállított metán éves mennyiségét. A számításokhoz itt is az éves 8.000 óra rendelkezésre állás lesz az alap kiindulás.

$$\dot{V}_{CH_4} = x_{CH_4} * \dot{V}_{biogáz} = 60\% * 347,5 \frac{m^3}{h} = 208,5 \frac{m^3}{h} \quad (19)$$

$$8.000 \frac{h}{év} * 208,475 \frac{m^3}{h} = 1.667.800 \frac{m^3}{év} \quad (20)$$

Ennek a mennyiségű metánnak az energiatartalma:

$$\dot{E}_{CH_4} = L_f * \dot{V}_{CH_4} = 35 * 10^{-3} * 1.667.800 = 58.373 \frac{GJ}{év} = 16.214 \frac{MWh}{év} \quad (21)$$

Ebből adódóan az óránként előállított $347,5m^3$ ($208,5m^3$) biogáz energiatartalma:

$$\dot{E}_{biogáz} = L_f * \dot{V}_{biogáz} = 35 * 208,5 = 7.296,6 \frac{MJ}{h} \quad (22)$$

A bevitt anyag energiatartalmával ($1.159 \frac{MJ}{t}$) végezzük el a számítást és figyelembe vesszük, hogy szervesanyag mintegy 50%-a a rothasztott iszapban marad, valamint a szervesanyag másik 50%-ának csak a 60%-ából lesz metán:

$$\dot{m}_{iszap} = \frac{\dot{E}_{biogáz}}{x_{sza} * x_{CH_4} * \dot{E}_{iszap}} = \frac{7.296,625}{50\% * 60\% * 1.159} \cong 20,98 \frac{t}{h} \quad (23)$$

Emellett figyelembe kell vennünk az üzemünk korábban kiszámított 9,32%-os önfogyasztását is:

$$\dot{m}_{iszap} = \frac{20,98}{90,68\%} = 23,14 \frac{t}{h} \quad (24)$$

Ezáltal a biogáz üzembe éves szinten a bevitt energiamennyiség:

$$\dot{E}_{biogáz,év} = \sum \dot{m}_{iszap} * \dot{E}_{iszap} * t_{rendelkezésreállítás} \quad (25)$$

$$\dot{E}_{biogáz,év} = 23,14 * 1.159 * 8.000 = 214.575 \frac{GJ}{év} = 59.604 \frac{MWh}{év} \quad (26)$$

Tehát éves szinten 59.604 MWh energiát kell bevinnünk $\dot{E}_{CH_4} = 16.214$ MWh előállításához. A korábban meghatározott 27%-os hasznosítási arányt igazolja vissza ez a két szám.

$$\frac{16.214}{59.604} = 27,20\% \quad (27)$$

A keletkező rothasztott iszapunknak a szállítási és lerakási költségét is figyelembe kell venni.

A keletkező, elszállítási igényű szilárd frakció $41 \frac{t}{nap}$ vagy $1,708 \frac{t}{h}$. $55 \frac{EUR}{t}$ fajlagos költséggel és 8000 óra évi üzemidővel kalkulálva a következő:

$$8000 \frac{h}{\text{év}} * 1,708 \frac{t}{h} * 55 \frac{EUR}{t} = 751.666 \frac{EUR}{\text{év}} \quad (28)$$

Mint ahogyan azt a 17. ábrán is láthatjuk, napi szinten összesen 151 tonna nyersanyagot adagolunk be az üzembe és 141 tonna távozik rothasztott iszapként. Ez az arány 93,3%-nak felel meg. A rothasztott iszap energiatartalma $2.320 \frac{MJ}{t}$. Ezáltal:

$$\dot{m}_{r.iszap} = \frac{141}{24} * 0,933 = 5,875 \frac{t}{h} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{r.iszap} &= \dot{m}_{r.iszap} * E_{r.iszap} * t_{rendelkezésreállítás} = \\ \dot{E}_{r.iszap} &= 5,875 * 2.320 * 8000 = 109.040 \frac{GJ}{\text{év}} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\dot{E}_{r.iszap} = 30.288 \frac{MWh}{\text{év}} \quad (31)$$

Tehát a visszamaradt rothasztott iszap energiatartalma közel kétszer annyi energiát tartalmaz, mint az előállított biogáz:

$$\frac{\dot{E}_{r.iszap}}{\dot{E}_{CH_4}} = \mathbf{1,868} \quad (32)$$

Az előállított metán mennyisége mellett úgy gondolom fontos, hogy szót ejtsünk az éves szinten képződő szén-dioxid mennyiségéről is:

$$\dot{V}_{CO_2} = 40\% * \frac{8339}{24} * 8000 = 1.111.866 \frac{t}{\text{év}} \quad (33)$$

Több mint 1,1 millió tonna szén-dioxidot bocsájt ki az eljárás környezeti terhelésként a légkörbe.

3.1.2 A technológia korlátai

Mint ahogy azt már az előző számításokban is igazoltam, a bevitt nyersanyagból csupán 9% körüli nettó hatásfokkal vagyunk képesek előállítani villamos energiát és emellett jelentős hőt termelünk. A hőfogyasztókhoz kiadható hőteljesítmény 26.500kWht. A biogáznak sajátos jellemzői vannak, amelyek befolyásolhatják az üzem termelékenységét. A fűtőértéke a biogáz összetételétől függ, és továbbra is a hasznosítás egyik legfontosabb kérdése. A biogáz összetétele az üzemi paraméterek változtatásával befolyásolható. Az olyan tényezők, mint a hőmérséklet, a retenciós idő, a rothasztóba való bemenet sebessége, a nyersanyag összetétele stb. befolyásolják a biogáz-termelés hatékonyságát, és jelentős szerepet játszanak a biogáz végső összetételében. Ezért a fűtőérték sok működési paramétertől függ. Ezen túlmenően a biogáz közvetlen hasznosíthatóságát az olyan szennyeződések, mint például nitrogéngáz (N_2), oxigéngáz (O_2), hidrogéngáz (H_2), hidrogén-szulfid (H_2S), szén-monoxid (CO) és ammónia (NH_3). Ezek olyan problémákat okozhatnak, mint például a korrózió, a toxicitás és a fűtőérték csökkentése. A 17. ábrán is

megfigyelhetjük, hogy az előállított biogázunk 60%-ban tartalmaz metánt, és 40%-ban széndioxidot. Ez a CO₂ mennyiség rontja a gáz égésének minőségét, csökkenti a gázmotor élettartamát és nem mellesleg jelentős környezeti terhelést eredményez. A visszamaradt rothasztott iszap tárolása és szállítása úgyszintén növeli a karbon lábnyomunkat. A rothasztott iszapot talajjavítóként fel tudjuk használni, azonban továbbra is mennek végbe olyan folyamatok, amelyek talajemisszióként további szén-dioxid és metán kibocsátáshoz vezetnek. Ezek a gázok már szennyezőanyagként szabadon a légkörbe juthatnak. [35]

Az energiaelőállítás mellett viszont vannak további tényezők is, amiket figyelembe kell venni. Ilyenek például az infrastrukturális kihívások. A biogáz előállításához szükséges alapanyag elérhetősége is gondot jelenthet. A vidéki háztartásokból hiányozhat a szükséges számú állatállomány ahhoz, hogy elegendő trágyát termeljenek a megfelelő mennyiségű biogáz előállításához annak érdekében, hogy az adott háztartás szükségleteit kielégítsék. Háztartásonként körülbelül nyolc szarvasmarhára lenne szükség a biztonságos ivóvíz, villany és főzógáz biztosításához. Továbbá a szennyvizek nem kontrollált módon történő gyűjtése és felhalmozása a talaj és az ivóvízkészlet elszennyeződéséhez vezethet. [35]

További nehézségeket okoz a biogáz üzemek terjedésében az üzem okozta zajszennyezés, az üzem okozta bűz és a rothasztók nagymértékű vízigénye. Az anaerob rothasztás optimális lefutásának érdekében rothasztóba töltendő víz és trágya mennyisége 1:1 arányban oszlik meg. A biogáz-termelés nem jelenthet problémát a nedves évszakokban, de a száraz évszakokban gondot okozhat, különösen ott, ahol nagy a távolság a vízellátástól és a korlátozott vízellátású régiókban. [35]

3.2 Az SCWG-HU technológia bemutatása

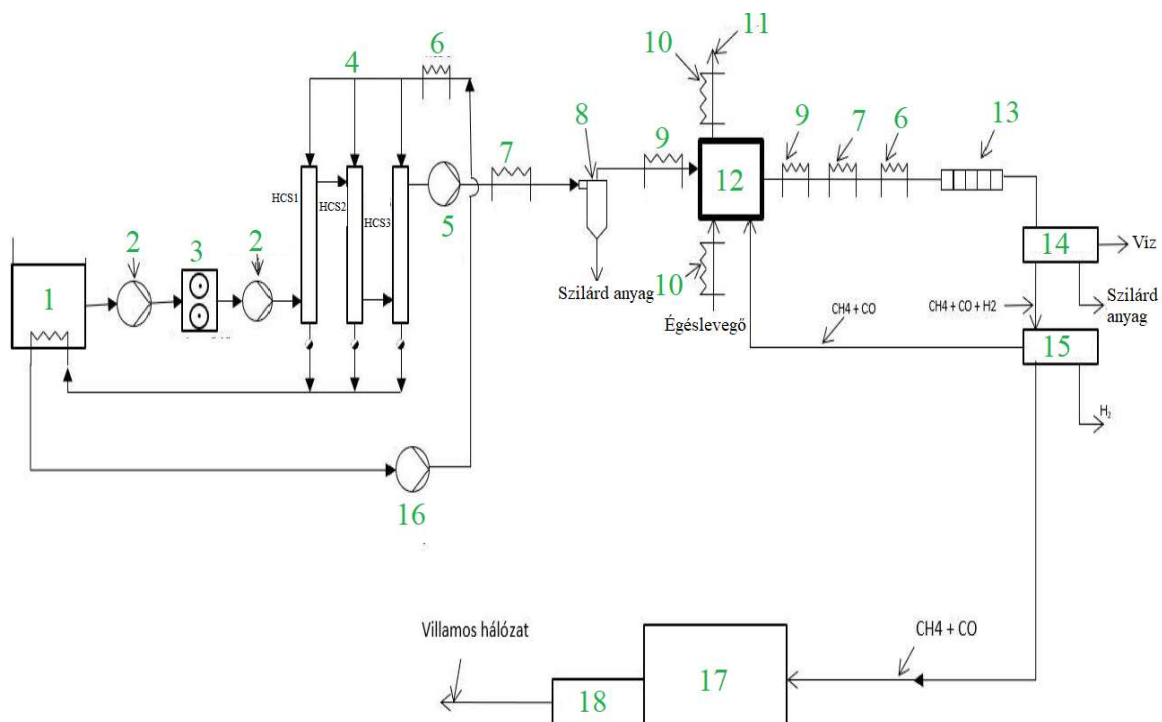
Az SCW-HU, mint ahogy a rövidítés is utal, egy magyar továbbfejlesztése a már jól ismert szuperkritikus vizes elgázosítási eljárásának. A fejlesztés célja a fenntarthatóság, a káros környezeti kibocsátás csökkentése és a gazdaságos ipari alkalmazás elérése. Az eljárás hazai elterjedése továbbá egybevágna az uniós szennyvíziszap kezelési és hasznosítási stratégiával is és kiváló oktatási központként is szolgálhatna a hazai egyetemekkel együttműködve.

A Karlsruheban épített, $100 \frac{kg}{h}$ kísérleti üzem kiváló információ- és tapasztalatforrásként szolgált a technológia fejlesztésében. A pilot üzem több technikai hátráltató tényezőt is felszínre hozott (alacsony kigázosodási fok, csőreaktor eltömődése), amelyek akadályozták a technológia széleskörű ipari elterjedését. Az SCWG-HU eljárás ezeket a hiányosságokat

hivatott kiküszöbölni és egy stabil üzemű, energiahatékony szennyvíziszap feldolgozást tesz lehetővé.

3.2.1 Az eljárás lépéseinek ismertetése

Az eljárás alkalmas mind a lakossági és az ipari (húsipar, söripar stb.) szennyvíziszapok és nedves biomasszák (pl. romlott élelmiszerek, telepek híg trágyája, kommunális hulladék szerves frakciói) hatékony feldolgozására és ebből nagy H_2 tartalmú gáz előállítására. Az eljárás után főként desztillált vizet - amit felhasználhatunk vízbontókban vagy akár öntözésre -, valamint egy gáz elegyet kapunk. Az elegy főként hidrogént tartalmaz (40-65%), - amit felhasználhatunk a megfelelő hajtásrendszerrel felszerelt közlekedési eszközök energiaforrásaként -, emellett megtalálható benne még metán (30-40%) és szén-monoxid (8-15%), amiket gázmotorban elégethetünk villamos energia előállítására vagy felhasználhatjuk a reaktor hőigényének kielégítésére. Az inert szilárd anyagokat foszforeltávolítás után az építőipar kiválóan tudja hasznosítani. A 18. ábra az SCWG-HU elvi vázlatát szemlélteti, a 10. táblázat pedig kitér az üzem főbb elemeire és azok funkcióira.



18. ábra: Az SCWG-HU technológia elvi vázlata [37]

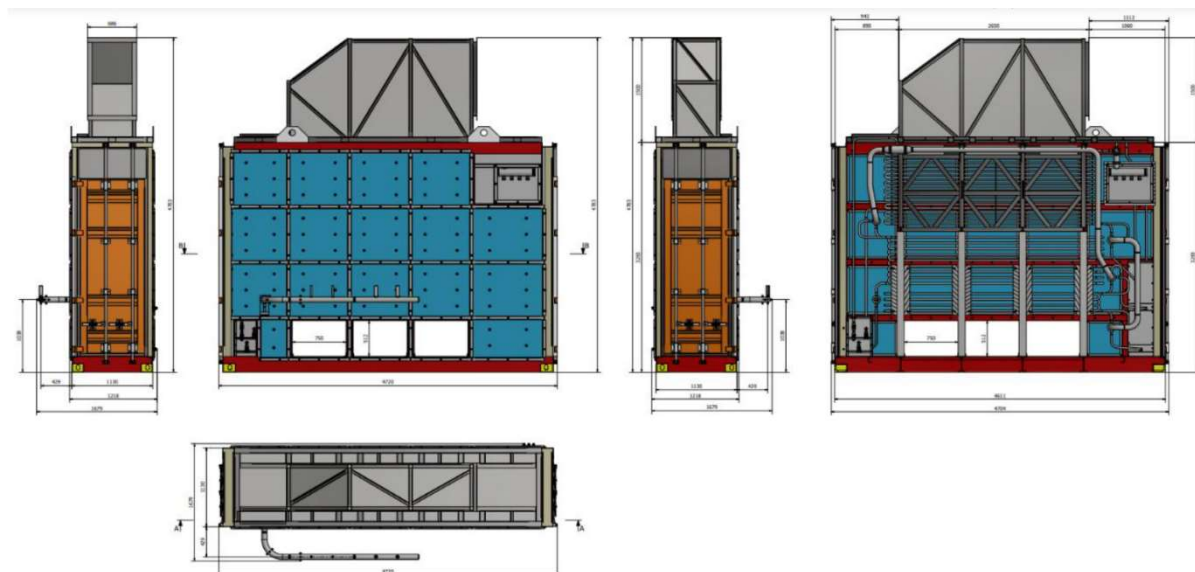
10. táblázat SCWG-HU reaktor főbb elemei

Pos.	Megnevezés	Beépített mennyiség	Fő funkció
1	Iszap puffer tartály	1	Feldolgozásra váró iszap tárolása
2	Zagyszivattyú	2	Iszap szivattyúzása az őrlőbe, majd a kapartfalú hőcserélőkbe
3	Nedves őrlő malom	1	Iszap homogenizálása főzés előtt
4	Kapartfalú hőcserélők	3	14-16 bar nyomáson, 180-190 Celsius fokon az iszap főzése 30 percig
5	Nagynyomású szivattyú	1	Az előfőzött elegy bejuttatása a reaktorba nagy nyomáson
6	Hőcserélő	2	Iszap fokozatos fűtése
7	Hőcserélő	2	Iszap fokozatos fűtése
8	Hidrociklon csoport	1	A szervesetlen sók kiülepítése az iszaptól
9	Hőcserélő	2	Iszap fűtése a reaktor hőmérsékletéhez közeli állapotra
10	Hőcserélő	2	A reaktor fűtéslevegője és kipufogólevegőjének hasznosítása
11	Kémény	1	Reaktor égéslevegőjének elvezetése
12	Szuperkritikus üzemű csőreaktor	1	Iszap elgázosítása legalább 90%-os mértékben (ultrahang rezgőfejekkel ellátott rendszer)
13	Nyomástörő	1	A szintézisgáz környezeti nyomásra hozása
14	Szeperator	1	Szilárd anyag - gáz szétválasztása
15	Szeperator	1	Gáz-gáz szétválasztása (hidrogén)
16	Fűtővíz hőszivattyú	1	Fűtővíz szállítása a HCS 6-hoz
17	Gázmotor	1	Metán és szén-monoxid elégetése
18	Generátor	1	A gázmotor mechanikus energiájának átalakítása villamos energiává

Az üzem 3 fő részből áll, egy adagoló, egy reakciós és egy szétválasztó rendszerből. Az adagoló rendszernek a puffer tartály az első eleme. Itt történik a nyersanyagunk felhalmozása és innen kerül be az első zagyszivattyúba iszap. A szivattyú először egy koloid őrlőmalomba juttatja be az iszapot, ahol homogenizáljuk azt. Ez a lépés a főzési fázis előkészítéséhez fontos, mivel inhomogén elegynek a hőkezelése kevésbé hatékony. Az őrlés után újra egy zagyszivattyúba kerül az alapanyagunk, amit innen 15-16 bar nyomáson a kapartfalú hőcserélőkbe juttatunk. A hőkezelés fő célja a szerves sejtekben lévő megkötött víz mennyiségének csökkentése. A hőcserélők 14-16 bar nyomáson üzemelnek és 180-190°C

üzemi hőmérsékleten főzik az iszapot. A főzés után végeredményként egy 40% szárazanyagtartalom körüli, jól szivattyúzható elegyet kapunk. A következő szakasz a reakciós rendszer.

Az elegyet egy nagynyomású (260-280 bar) szivattyúba töltjük, ami innen először a hidrociklon csoportba, majd a reaktorba juttatja azt. A szivattyú nyomása fontos, hogy valamivel magasabb legyen, mint magának a reaktornak, mivel némi nyomáseséssel számolni kell. A hidrociklon csoport előtt a HCS4-es számú hőcserélő felmelegíti az iszapot 420°C körüli értékre. Mint azt már korábban kifejtettem, a víz kritikus hőmérsékletének elérése után, annak mintegy 35-55°C-kal való meghaladásakor, az addig oldatban lévő szervesetlen sók kiválnak, és képesek lerakódni a berendezés csővezetékeiben, a reaktorcsövekben, illetve a reaktorcsövek felületein. A hidrociklon csoport egy több hidrociklonból álló telep, a berendezések egymásra vannak sorosan kötve, mind különböző szűrési képességgel ellátva. A sóleválasztási hatásfoka a rendszernek 95% körül mozog. A hidrociklon csoport és a reaktor között elhelyezkedik még egy HCS5 megnevezésű hőcserélő, ami a reaktor saját hőmérsékletéhez közeli állapotra melegíti az elegyet. Ez a hőmérséklet 580°C körül tehető. A csőreaktorba kerülve megkezdődik az iszap az elgázosodást. A reakció teljes lefolyása 4-5 percet vesz igénybe, függően az elegysebességtől és a csőrendszer átmérőjétől. Annak érdekében, hogy csökkentjük a szükséges reakcióidőt, ezzel egyúttal pedig a reaktor méretét, ultrahang generátorokat érdemes alkalmazni. Ezek a berendezések a reaktor csőveire felerősített rezgőfejek, amik csökkentik az elgázosodás során a kokszképződést és annak a lerakódását, ezzel megakadályozva a hidrociklon után visszamaradt szilárd részecskék csőfelületre történő lerakódását. A rezgőfejek egyúttal növelik a szervesanyag részecskék fajlagos felületét, ezáltal elősegítik a teljes elgázosodást. A reakcióhoz hőt kell közölnünk a rendszerrel, amit a reaktor alatt elhelyezkedő gázüzemű szőnyegégő biztosít. A szőnyegégőnek az égéslevegőjét 600°C-ra előmelegítjük egy léghevítővel, amit a csőreaktor füstgázai fűtenek. A szőnyegégő égéslevegőjét és a reaktor kipufogógázát a HCS7 hőcserélők hasznosítják a rendszer hőszükségleteinek pótlására. Ezek mind a technológia önfogyasztását hivatottak csökkenteni. A csőreaktor szerkezetét a 19. ábra szemlélteti.



19. ábra: Az SCWG-HU csőreaktorának modellje [14]

A csőreaktorból kilépve, egy 90% feletti mértékben elgázosodott elegyet kapunk. Ez az elegy főként szilárd anyagból (szervetlen sók), desztillált vízből és gázokból (hidrogén, metán és szén-monoxid) áll. A reaktor után három hőcserélő biztosítja a lehető legkevesebb veszteség hő keletkezését. Ezen a szakaszon az elegyünk már 200°C alatti hőmérsékleten, azonban még üzemi nyomáson van. Innen kerül a nyomástörőbe. Itt megtörténik a környezeti nyomásra hozása, aminek eredményeként sejtrobbanás következik be. A kilépő gőzt tárcsás turbinával hasznosíthatjuk. A következő lépés a szeparáció.

Ebben a szakaszban először az első szeparátorba juttatjuk az elegyünket. Itt körülbelül 1% szilárdanyag tartalommal számolhatunk. Leválasztásra kerül az összes szilárd részecske és desztillált víz. Hátra marad a hidrogén, metán és szén-monoxid. Innen juttatjuk a szintézisgázunkat a következő szeparátorba. Ez egy membrános szeparátor, aminek a segítségével külön választjuk a hidrogént a metántól és a szén-monoxidtól és palackozhatjuk azt. A CH_4 és CO egy kisebb részét (11-12%) a reaktor fűtésére, a többit pedig gázmotorban való elégetésre célszerű felhasználni. A gázmotor által meghajtott generátor aztán kapcsolt villamos energiát állít elő, ebből a hálózatra adható villamos áram-, és kapcsoltan hő termelhető a szennyvíztelep energiaszükségleteinek kielégítésére. A gázmotor mérettől függően körülbelül 40%-os villamos hatásfok mellett képes üzemelni. A gázmotor 480°C körüli kipufogógázát egy hőcserélő hasznosítja, mivel ebből állítja elő az előfűzésre szükséges energiát.

3.2.2 Energia-, és anyagmérlegek

A számításaim során az eljárás hatékonyságát annak anyagmérlegének és energiamérlegének kiszámítása után levont következtetések alapján fogom meghatározni. A szennyvíziszapok SCWG elgázosítással történő feldolgozásának célja a 80% nedvességtartalmú, úgynevezett „víztelenített szennyvíziszap” mintegy 12% szervesanyag tartalmának szintézisgázzá alakítása és gázmotorban való hasznosítása villamosenergia és hőenergia előállítására. A szennyvíziszap 20%-os szilárd anyag tartalmából további 8% szervesetlen anyag, amely építőipari célra hasznosítható, miután kivontuk belőle a foszforvegyületeket. Szennyvíziszap feldolgozása esetén az SCWG-HU eljárás energetikai hatásfoka 68% és 77% között lehet az üzemnagyság függvényében. Az elért jó hatásfok az iszap megfelelő előkészítésének, a reaktor szerkezetének és a reaktor előtt és után alkalmazott hőcserélőknek köszönhető. A hőcserélőkkel a reaktorból távozó elegy hőtartalmát a reaktorba belépő elegy előmelegítésére fordítjuk.[34]

Számításaimat az SCWG-HU anyagmérlegének elemzésével fogom kezdeni. A 20. ábra az üzemi bemenetet és a kimentet hivatott szemléltetni.



20. ábra: SCWG-HU anyagmérlege [saját szerk.]

1 $\frac{t}{h}$ tömegáramú üzemi nagyság esetén az anyagmérleg az alábbi:

- bemenő iszapmennyiség: $1.000 \frac{kg}{h}$;
- nedvességtartalma: $800 \frac{kg}{h}$ víz;
- szerves szárazanyag: $120 \frac{kg}{h}$;
- szervesetlen szárazanyag: $80 \frac{kg}{h}$.
- kijön $120 \frac{kg}{h}$ szintézisgáz (az iszappal bemenő energiatartalom hasznosítható része);
- $760 \frac{kg}{h}$ víz (felhasználható ipari víz vagy öntözési célokra);
- $80 \frac{kg}{h}$ szervesetlen anyag, tovább-feldolgozásra;
- $40 \frac{kg}{h}$ víz a szervesetlen anyaggal együtt (veszteség).

Az eredményekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy egy óránként 100 egység iszapot feldolgozó üzem esetén 12 egység szintézisgázt (hidrogén, metán szén-dioxid és etán), 76 egység vizet, 8 egység további feldolgozásra alkalmas szervesetlen anyagot (építőipari alkalmazás foszforeltávolítás után) és 4 egységnyi víz-szervesetlen anyag veszteséget állít elő.

A gáz elegy tömege az anyagmegmaradás törvénye alapján 120 kg/h. Összetevői és azok százalékos aránya a laboratóriumi mérések alapján:

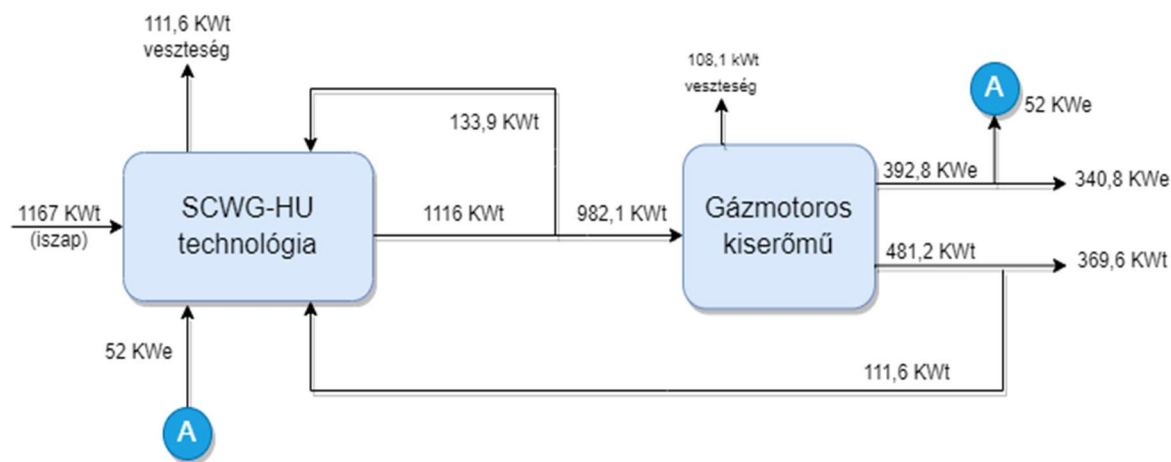
- $61,2 \text{ m}^3$ metán (43,9 kg)
- $92,6 \text{ m}^3$ hidrogén (8,2 kg)
- $12,8 \text{ m}^3$ etán (15,5 kg)
- $26,4 \text{ m}^3$ szén-dioxid (52,3 kg)

$$61,2 + 92,6 + 12,8 + 26,4 = 193 \text{ m}^3 \text{ szintézisgáz} \quad (34)$$

$$43,9 + 8,2 + 15,5 + 52,3 = 119,9 \text{ kg} \quad (35)$$

Az egyes összetevők aránya a szintézisgázban:

$$61,2:193 + 92,6:193 + 12,8:193 + 26,4:193 = 31,71 \% \text{ CH}_4 + 47,98 \% \text{ H}_2 + 6,63 \% \text{ C}_2\text{H}_6 + 13,68 \% \text{ CO}_2 = 100 \% \text{ szintézisgáz} \quad (36)$$



21. ábra: SCWG-HU energiamérlege [saját szerk.]

A már ismert gázeloszlás alapján a 21. ábrán látható SCWG-HU energiamérlege az alábbi számításokkal jött ki:

$$61,2 \text{ m}^3 * 35,88 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} + 92,6 \text{ m}^3 * 10,78 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} + 12,8 \text{ m}^3 * 64,35 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} = 2.195,86 \text{ MJ} +$$

$$998,23 \text{ MJ} + 823,68 \text{ MJ} = 4.017,77 \text{ MJ} = \frac{4.017,77}{3,6} = \mathbf{1.116 \text{ kWh}_t} \quad (37)$$

Az óránként bevitt szennyvíziszap termikus teljesítménye:

$$21 \frac{\text{GJ}}{\text{t}} * 0,2 = 4,2 \frac{\text{GJ}}{\text{h}} = 4.200 \text{ MJ} \rightarrow \frac{4200}{3,6} = 1.167 \text{ kW}_t \text{ termikus telj.} \quad (38)$$

Az elgázosodás aránya:

$$\frac{4.017,77}{4.200} = 95,66\% \quad (39)$$

Ez az elgázosodás mértéke, ami intézkedésekkel tovább javítható.

A nedves őrlés és a szivattyúzás villamos teljesítmény igénye nettó $52 \frac{\text{kW}_e}{\text{h}}$, a tárcsás turbina általi nyomási energia hasznosításnak köszönhetően.

A SCWG-HU folyamat termikus önfogyasztása esetében különféle mérési eredmények alapján 12%-os mértékkel számolhatunk:

$$1.116 * 0,12 = 133,9 \text{ kW}_t \quad (40)$$

A SCWG-HU folyamat termikus veszteségei esetében a keletkező szintézisgáz 10%-os mértékével számolhatunk:

$$1.116 * 0,1 = 111,6 \text{ kW}_t \quad (41)$$

Az SCWG-HU reaktor termikus hatásfokának kiszámításához ismernünk kell a reaktorból kilépő teljesítményt:

$$1.116 \text{ kW}_t - 133,9 \text{ kW}_t - 111,6 \text{ kW}_t = 870,5 \text{ kW}_t \quad (42)$$

$$100 * \left(\frac{870,5 \text{ kW}_t}{1.167 \text{ kW}_t} \right) = \mathbf{74,6\%} \quad (43)$$

A következő lépésként számítsuk ki az SCWG-HU folyamat villamos és termikus hatásfokát.

A gázmotoros kiserőművel termelhető villamos teljesítmény mértéke:

$$(1.116 - 133,9) = 982,1 * 0,4 = 392,8 \text{ kW}_e \quad (44)$$

$$\text{Bruttó villamoshatásfok: } 100 * \left(\frac{392,8 \text{ kW}_e}{1.167 \text{ kW}_e} \right) = 33,7 \% \quad (45)$$

$$\text{Villamos önfogyasztás (lásd fentebb): } 52 \text{ kW}_e \quad (46)$$

$$\text{Nettó, kiadható villamos teljesítmény: } 392,8 - 52 = 340,8 \text{ kW}_e \quad (47)$$

$$\text{Nettó villamos hatásfok: } 100 * (340,8 : 1.167) = \mathbf{29,2 \%} \quad (48)$$

A gázmotoros kiserőművel termelhető hőteljesítmény:

$$(1.116 - 133,9) = 982,1 * 0,49 = 481,2 \text{ kW}_t \quad (49)$$

$$\text{A SCWG reaktor hőveszteségeinek pótlására (lásd fentebb): } 111,6 \text{ kW}_t \quad (50)$$

$$\text{Nettó, kiadható hőenergia: } 481,2 - 111,6 = 369,6 \text{ kW}_t \quad (51)$$

$$\text{A folyamat nettó termikus hatásfoka: } 100 * \left(\frac{369,6 \text{ kW}_t}{1.167 \text{ kW}_t} \right) = \mathbf{31,7 \%} \quad (52)$$

Ezáltal az SCWG-HU folyamat összhatásfoka a következő:

$$\underline{29,2\% + 31,7\% = \mathbf{60,9\%}} \quad (53)$$

Tehát, ha egy $1 \frac{t}{h}$ üzem mérettel számolunk, akkor annak az összhatásfoka 60,9% lehet.

Az $1 \frac{t}{h}$ üzemméret mellett $80 \frac{kg}{h}$ további feldolgozásra alkalmas anyag keletkezik, amit szállítani és tárolni szükséges. Ennek a költségének kiszámításához a korábban megadott $55 \frac{EUR}{t}$ és $8000 \frac{h}{év}$ rendelkezésreállással fogok számolni.

$$0,08 \frac{t}{h} * 8000 \frac{h}{év} * 55 \frac{EUR}{t} = 35.200 \frac{EUR}{év} \quad (54)$$

3.3 Főbb paraméterek összehasonlítása a két technológiában

A két technológia összehasonlítását mind technológiai, környezeti és gazdasági szempontból fogom megtenni. Ennek az elvégzéséhez a fentebb meghatározott anyag- és energiamérlegek, továbbá a kapott árajánlatok fognak alapul szolgálni. A 11. táblázatban a főbb szempontok alapján összehasonlítást tettem a két technológia között.

11. táblázat A két technológia összehasonlítása főbb szempontok alapján [saját szerk.]

Nr.	Összehasonlítási szempont	SCWG-HU	Biogáz üzem
1	Üzemméretek [t/h]	1	6,29
2	Bemenő szerves nyersanyag [t/h]	0,12	0,84
3	Bemenő szervesetlen nyersanyag [t/h]	0,08	0,93
4	Bemenő teljesítmény [MW/h]	4.180	7.296,63
5	Megtermelt biogáz/szintézisgáz [m ³ /h]	193	347,45
6	Megtermelt energia [MWh/h]	0,71	2,2
7	Gázosodás mértéke [%]	95,96	30,14
8	Keletkező gázok hasznosítható aránya [%]	86,32	60
9	Villamos önfogyasztás [%]	13,2	11,96
10	Termikus önfogyasztás [%]	12	18,68
11	Nettó villamos hatásfok [%]	29,2	8,66
12	Nettó termikus hatásfok [%]	31,7	15,03
13	Nettó hatásfok [%]	60,9	23,69
14	Kibocsátott szén-dioxid aránya a keletkező szintézisgázhoz/biogázhoz képest [%]	13,2	40
15	Visszamaradt anyagok aránya a teljes bevitt mennyiséghez képest [%]	8	93,3
16	Visszamaradt anyagok 1 t/h vetítési aránnyal számított szállítási költsége [EUR/év]	35.200	119.501
17	Beruházási költség [EUR]	3.750.000	1.965.900

A legtöbb helyen százalékos arányokkal dolgoztam, mivel a két üzem eltérő méretű, tömegáramú. A szempontok bővebb magyarázata sorszámok szerint a következő:

1. Az SCWG-HU üzem $1 \frac{t}{h}$, míg a Zorg Biogas GmbH által javasolt biogáz üzem $6,29 \frac{t}{h}$ tömegárammal jellemezhető.
2. Az üzembe óránként bemenő nyersanyag szerves anyagtartalma.
3. Az üzembe óránként bemenő nyersanyag szervesetlen anyagtartalma.
4. A bemenő nyersanyagban megtalálható, tonnára vetített energiatartalom.
5. A reaktorból kilépő gázok köbméterben mért mértéke.
6. A megtermelt biogáz/szintézisgázok energetikai hasznosításából kinyerhető energia

mennyisége.

7. A 7-es szempont a bevitt nyersanyag elgázosodásának mértéke. Az SCWG-HU esetében ez közel 96% volt, azonban ez még katalizátorokkal és az előkészítés módjával tovább javítható érték. A biogáz üzem esetében ez 30,12%, aminek legfőbb oka, hogy a bevitt nyersanyag energiatartalmának több mint a fele bent marad a rothasztott iszapban.
8. A keletkező szintézisgázoknak nem a teljes mennyisége hasznosítható. A szuperkritikus üzemű reaktorban a gáz elegy szén-dioxid tartalma 13,68%, míg a biogáz üzemben 40%. Ez közvetlenül nem hasznosítható.
9. A villamos önfogyasztás az SCWG-HU üzem esetében ez 13,2%, ami a nedves őrlés és a szivattyúzás villamos energiaszükségletének tudható be. A biogáz üzem esetében a szivattyúzás, adagolás és a tartályokban való keverés teszi ki a 11,96% mértékű villamos önfogyasztást.
10. Az SCWG-HU üzemben lejátszódó reakciónak magas hőenergia igénye van, ezáltal a termikus önfogyasztása 12% körül vehető figyelembe. Ezt pótoljuk a többletgázok (pl. CH_4) egy részének visszajuttatásával és azok rendszerben való elégetésével. A biogáz üzem esetében számítások alapján 18,68% a termikus önfogyasztás. Ezt a korszerű szigeteléssel ellátott anaerob rothasztó alacsony hővesztesége teszi lehetővé.
11. A veszteségekkel való korrigálás után megkaptuk az egyes üzemek nettó villamos hatásfokát.
12. A veszteségekkel való korrigálás után megkaptuk az egyes üzemek nettó termikus hatásfokát.
13. Az SCWG-HU üzem esetében a villamos- és termikus hatásfok összesítésével kapjuk meg a 60,9% összhatásfokot. A biogáz üzem esetében a bruttó hatásfokot korrigálva a villamos önfogyasztással kaphatjuk meg a 23,69% nettó hatásfokot
14. Az SCWG-HU üzem kísérleti állapotában mért szintézisgáz arányok laboratóriumi mérése alapján a keletkező széndioxid 13,2%-a a teljes elegynek. A biogáz üzem esetében körülbelül 40%-ra tehető ez a szén-dioxid mennyiség.
15. A szuperkritikus üzem esetében 8% további feldolgozásra alkalmas szervesetlen szárazanyag keletkezik. Ezt a visszamaradt mennyiséget utána az építőipar tudja hasznosítani. A Zorg biogáz üzem esetében a szűrlemény és a szilárd frakció együttese a teljes bevitt anyag mennyiségnek a 93,3%-át teszi ki. A szilárd frakció

szállítás után a magas visszamaradt szervesanyagtartalma miatt kiváló talajjavítóként szolgálhat a mezőgazdaság számára. A szűrlemény további tisztítás után visszakerülhet a természetes vizekbe.

16. A szállítási költség releváns számításához a biogáz üzem tömegáramát $1 \frac{t}{h}$ -ra vetítettem. Az így kapott értékek alapján látható, hogy a biogáz üzemben keletkező elszállítási költségek több mint a háromszorosát jelentik a szuperkritikus vizes üzemének. Mindkét esetben további felhasználásra alkalmas anyagokról beszélünk, azonban a biogáz üzem esetében a szilárd frakcióban további lebontó folyamatok játszódnak le a lerakást (pl. talajjavítóként való felhasználás) követően, ami további szén-dioxid kibocsátáshoz vezet.
17. Az SCWG-HU üzem nagyobb beruházási költségekkel rendelkezik, azonban ez optimalizált üzemméret mellett arányosan mérséklődhet. A rendszer komplexitása teszi drágábbá a folyamatot, azonban jobb megtérülési mutatóval rendelkezik a biogáz üzemhez viszonyítva, mivel lényegesen magasabb hatásfokkal rendelkezik, kevesebb elszállítandó melléktermék képződik a folyamat során.

4 Az SCWG-HU technológia nyújtotta lehetőségek

Az SCWG-HU számos műszaki, gazdasági és közösségi kihívást és lehetőséget hordoz magában. A jelen fejezetben ezeket fogom megvizsgálni és röviden kifejteni.

Hazánkban többek között a technológiát szennyvíztelepeken kiegészítő technológiaként is tudjuk alkalmazni. Mint már korábban is említettem a szennyvíztelepek üzemeltetési költségében magas hányadot tesz ki az energia és a keletkező melléktermékek tárolása szállítása. A rendszer integrálása során a fő szempontok a következők:

- A szennyvíztelepek önellátóvá tétele energetikai szempontból;
- A szennyvíztelepeknél keletkező rothasztott iszapok szállítási költségének csökkentése;
- A szennyvíztelepek karbon lábnyomának nagymértékű csökkentése;
- A szennyvíztelepek szennyvíziszapjából értékesíthető hő-, és villamos energia valamint karbonszegény hidrogén termelése;
- Körkörös gazdaság kialakítása a szennyvíztelepeken, a szennyvíziszapokban lévő foszforvegyületek kivonhatóvá tételével és a szennyvíziszapokból való desztillált víz termelésével.

A szennyvíztelepeken alkalmazott SCWG-HU üzem kiegészítő technológiaként alkalmazandó, azonban a legtöbb esetben önmagában is képes szerves hulladékok, melléktermékek hatékony feldolgozására. Ilyen például:

- Az SCWG-HU technológia adaptálása az ipari (pl. húsipari, söripari, konzervipari, papíripari, cukoripari stb.) szennyvíziszapok, valamint az egyéb nedves biomasszák (pl. vágóhídi hulladékok, belsőségek, nedves toll, romlott élelmiszerek, működő biogáz üzemek fenékmaradványai, állattartó telepek hígtrágyái, a kommunális hulladékválogató üzemek nedves szerves frakciói stb.) megújuló energia-termelő potenciáljának megteremtése céljából.
- Az SCWG-HU technológia adaptálása az 50% körüli nedvességtartalmú lignitek energetikai feldolgozásához. Az SCWG-HU csőreaktorából 72% körüli hidrogéntartalmú szintézisgáz kerül ki, és a lignitek esetében a SCWG-HU eljárás „tisztaszén technológiát” jelent.

- A 2G cellulóz alapú bioetanol technológiák 90% körüli nedvességtartalmú melléktermékeit (lignin, szeszmoslék) jelenleg rossz hatásfokkal feldolgozó technológiák (szárítás, majd égetés) kiváltása, ezáltal a cellulóz alapú etanol technológia versenyképessé tétele a keményítő alapú bioetanol gyártási technológiákkal.

Az SCWG-HU itthoni alkalmazása és fejlesztése nem csak műszaki és gazdasági lehetőségeket rejt magában, hanem az egyetemi képzések színvonalának növelését is elősegítheti. A magyar egyetemek mérnökképzését laborgyakorlatokkal és gyárlátogatásokkal tehetné sokszínűbbé.

Hazai mintaprojektként is szolgálhatna az első SCWG-HU pilot üzem. A magyarországi szennyvíztelepek területén felépített és működtetett projektek, mint a nedves biomasszából történő karbonszegény hidrogén előállítás mintaprojektjei, alapjai lehetnek szakmai turizmusnak. Az adott város területére szervezhetők üzemlátogatások, szakmai konferenciák és technológiai bemutatók egyaránt. [36]

A következő fejezetekben a hazai, éves szinten folyamatosan rendelkezésre álló megújuló biomassza energiaforrások energiatermelő potenciálját fogom részletezni. Szót ejtek többet között a lakossági szennyvíziszapokról és az olyan nedves biomasszákról, mint például a kukoricaszár, gabonaszalma.

4.1 Szennyvíziszapok

- Éves feldolgozható mennyiség: $1.230.000 \frac{t}{év}$
- Hidrogéntermelő potenciál vegyes iszapnál:

$$(4,18 \frac{GJ}{t}) = (\frac{4.180}{120}) * 0,263 * 075 = 6,87 \text{ kg } \frac{H_2}{t} \text{ iszap} \quad (55)$$

- 80% nedvességtartalom esetén $8.450 \text{ kg } \frac{H_2}{év}$
- A szintézisgáz fennmaradó energiatartalma a hidrogén leválasztása után:

$$4,18 \frac{GJ}{t} * (1 - 0,263) \quad (56)$$

- A termelhető fajlagos villamosenergia mennyisége:

$$\frac{4,18 \frac{GJ}{t} * (1 - 0,263) * 0,75 * 0,4}{3,6} = 0,257 \frac{MWh}{t} \text{ iszap.} \quad (57)$$

- A lakossági szennyvíziszap mennyiség éves villamosenergia potenciálja:

$$1.230.000 \frac{\text{t}}{\text{év}} * 0,257 \frac{\text{MWh}}{\text{év}} = 316.110 \frac{\text{MWh}}{\text{év}}. \quad (58)$$

- Az összesen beépíthető villamos teljesítmény:

$$\frac{316.110}{8.000} = \mathbf{40 \text{ MW}} \quad (59)$$

4.2 Nedves biomasszák

Magyarországon a mezőgazdasági ágazat leggyakoribb melléktermékei a kukoricaszár és a gabonaszalma. Ez egy nagy mennyiségben elérhető, folyamatosan keletkező biomassza. Az éves keletkező mennyiségek és az ebből előállítható etanol (lásd 22. ábra), illetve melléktermékének feldolgozásával kinyerhető energiamennyiségek a következők:

Kukoricaszár:

- Keletkező éves mennyiség: 7-8 millió $\frac{\text{t}}{\text{év}}$
- Éves feldolgozható mennyiség: 3.850.000 $\frac{\text{t}}{\text{év}}$
- Cellulóz alapú etanol termelő potenciál: 522.720 $\frac{\text{t}}{\text{év}}$ (663 millió liter)
- Hidrogén termelő potenciál: 27.328 $\frac{\text{t}}{\text{év}}$
- Villamosenergia termelő potenciál: 1.696.000 $\frac{\text{MWh}}{\text{év}}$ (a beépíthető villamos teljesítmény: 212 MW)



22. ábra: Kukoricaszárból előállított bioüzemanyag [37]

Gabonaszalma:

- Keletkező éves mennyiség: 4-5 millió $\frac{t}{év}$
- Éves feldolgozható mennyiség: 1.500.000 $\frac{t}{év}$
- Cellulóz alapú etanol termelő potenciál: 203.861 $\frac{t}{év}$ (259 millió liter)
- Hidrogén termelő potenciál: 10.658 $\frac{t}{év}$
- Villamosenergia termelő potenciál: 661.440 $\frac{MWh}{év}$ (a beépíthető villamos teljesítmény: 83 MW)

Jól látható, hogy egyedül ebből a két típusú biomasszából az éves szinten előállítható etanol 922 millió liter. A feldolgozott melléktermék H_2 mennyisége 37.986 $\frac{t}{év}$ és az összesen beépíthető villamos teljesítmény összesen 295 MW.

5 Összegzés

Szakdolgozatom témájául választott feladat alatt számos eljárást vizsgáltam meg és hasonlítottam össze. Munkám során mélyebb ismereteket szereztem a feldolgozási-hasznosítási eljárásokról, elemzési módszerekről. Ezek közül kiemelném az egyes technológiáknál alkalmazott energia- és anyagmérlegeket, amelyek segítségével pontos képet kaphatunk arról, hogy a bemenő és kimenő energiák között milyen arányok állnak fenn.

A munkám során megvizsgáltam, hogy pontosan mi az a szennyvíziszap, hazánkban éves szinten mennyi keletkezik belőle. Ezt követően meghatároztam milyen kezelési módszerek ismertek jelenleg a lakossági vagy ipari szennyvíziszapok esetében. A klasszikus talajjavítóként való alkalmazástól az innovatív szuperkritikus vizes elgázosításig számos eljárás áll rendelkezésünkre ennek a biomasszának a hasznosítására, azonban az alkalmazott eljárások hatásfoka egymástól jelentősen eltér. A magas nedvességtartalmú szennyvíziszap égetését például minden esetben meg kell, hogy előzze egy szárítás, ami fokozottan rontja az összhatékonyságokat. Miután ezeket megvizsgáltam arra a következtetésre jutottam, hogy a biogáz előállító üzemek és az SCWG eljárás képesek a leghatékonyabban feldolgozni a tárgyalt nyersanyagot.

A munkám során a legfőbb kihívást a biogáz- és a szuperkritikus vizes üzemek releváns összehasonlítása jelentette. A biogáz üzemek elemzésére a Zorg Biogas GmbH által megküldött árajánlat, míg az SCWG-HU hazai fejlesztésű eljárás során Coopinter Kft. által szolgáltatott kutatási eredmények szolgáltak alapul. Az energia- és anyagmérlegek meghatározásával kezdtem mindkét eljárásnál az elemzést, majd a kapott eredmények alapján összevetettem azokat. A 4. fejezetben jól látható, hogy az SCWG-HU lényegesen magasabb hatásfokkal, kevesebb visszamaradt, elszállítandó és lerakandó anyag és káros kibocsátás mellett képes előállítani energiát, mint a biogáz üzemek. Az SCWG-HU továbbá nem csak szennyvíziszapokból képes energiát előállítani, hanem bármely szerves anyagot tartalmazó nedves biomasszából. Az eljárás alkalmazása megoldást jelenthetne például a bioetanol előállítása során keletkező nagy mennyiségű melléktermék (lignin) hatékony feldolgozására is. Az előnyök mellett azonban figyelembe kell venni, hogy a technológia beruházási költsége magasabb, mint a biogáz üzem esetében. A biogáz üzemek már jól ismert, hazánkban is kiforrott eljárásnak minősülnek, ezzel szemben az SCWG-HU még sorozatgyártási körülmények között nem alkalmazott technológia, ebből is következik, hogy a CAPEX hányada magasabb.

A SCWG-HU technológia alkalmas lehet a szennyvíztelepi biogáz üzemek fejlesztésére is, az azokban keletkező rothasztott iszapok energetikai feldolgozásával, melynek eredményeként mintegy megduplázható a szennyvíztelepek energiatermelése. Erre főleg akkor-, és azért lehet szükség, ha a rothasztott iszapok nehéz fém-, gyógyszer- és patogén tartalma miatt nem lehetséges azok mezőgazdasági hasznosítása. Az Európai Unió országaiban, az egyre szigorúbb előírások miatt korlátozottabb és nehéz lett a szennyvíziszapok mezőgazdasági hasznosítása, gyakorlatilag azokat csak lerakásra, illetve a hulladéklerakók lefedésére, takarására engedik használni. A SCWG-HU eljárás alkalmazásával ennek a jelentős szállítási és lerakási költségeit is megtakaríthatjuk, a többlet-energiatermelésen túlmenően.

A fentiek mellett, az SCWG-HU technológia lehetővé teheti az eljárás végén keletkező inert anyagból a foszforvegyületek kivonását és keletkeztethet mintegy évi nyolcszáz ezer köbméter 650 °C-on kezelt tiszta víz, ami ipari felhasználásra (pld. elektromos vízbontók tápvize) alkalmas. Ezzel a SCWG-HU technológia alkalmazása elősegítheti a körkörös gazdaság kiépítését is.

A kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy az SCWG-HU eljárás jelentős műszaki, gazdasági és közösségi potenciálokkal rendelkezik. Megfontolandó nemcsak a szennyvíziszapok, hanem további nedves biomasszák energetikai célú hasznosítására is alkalmazni a hazai fejlesztésű SCWG-HU eljárást.

4. sz. függelék – Hallgatói és konzulensi nyilatkozat minta

NYILATKOZAT

Alulírott HUSBER EDVÁRD OTTÓ, a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, SZENT ISTVÁN Campus, LETESÍTMÉNYENERGETIKAI SZAKMÉRNÖK szak nappali/levelező* tagozat végzős hallgatója nyilatkozom, hogy a dolgozat saját munkám, melynek elkészítése során a felhasznált irodalmat korrekt módon, a jogi és etikai szabályok betartásával kezeltem. Hozzájárulok ahhoz, hogy Záródolgozatom/Szakdolgozatom/Diplomadolgozatom egyoldalas összefoglalója felkerüljön az Egyetem honlapjára és hogy a digitális verzióban (pdf formátumban) leadott dolgozatom elérhető legyen a témát vezető Tanszéken/Intézetben, illetve az Egyetem központi nyilvántartásában, a jogi és etikai szabályok teljes körű betartása mellett.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem*

Kelt: 2023 év 04 hó 18 nap



Hallgató

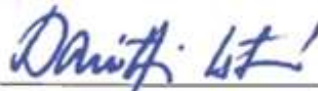
NYILATKOZAT

A dolgozat készítőjének konzulense nyilatkozom arról, hogy a Záródolgozatot/Szakdolgozatot/Diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A Záródolgozatot/Szakdolgozatot/Diplomadolgozatot záróvizsgán történő védésre javaslom / nem javaslom*.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem*

Kelt: Budapest 2023 év április hó 19. nap



Belső konzulens

*Kérjük a megfelelőt aláhúzni!

6 Irodalomjegyzék

- [1] Weingärtner, H., Franck, E. U. „*Supercritical water as a solvent*” Angew. Chem. Int. Ed. 44, 2672 – 2692, 2005
- [2] Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almås, Å., Singh, B. R. „*Sewage sludge disposal strategies for sustainable development*”, Environmental Research 156, pp. 39–46, 2017
- [3] Ding, A. Zhang, R., Ngo, H. H., He, X. „*Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery: A review*” Science of the Total Environment 769, 144451, 2021
- [4] Barry, D. Barbiero, C., Briens, C., Berruti, F. „*Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge*” Biomass and Bioenergy 122, pp. 472–480, 2019
- [5] Yan, S., Sellamuthu, B., Tyagi, R. D., Surampalli, R. Y. „*Wastewater Sludge Characteristics*” Sustainable Sludge Management: Production of Value Added Products, pp. 6-36, 2009
- [6] Cieřlik, B. M., Namieřnik, J., Konieczka, P., „*Review of sewage sludge management: Standards, regulations and analytical methods*” Journal of Cleaner Production, 2014
- [7] Pilarska, A. A., Dach, J., Pilarski, K., Witaszekm K. „*Impact of organic additives on biogas efficiency on sewage sludge*” Agricultural Engineering 3(151), pp. 139 -148, 2014
- [8] Ambulkar, A., The Editors of Encyclopaedia Britannica „*Wastewater treatment*” <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment/Oxidation-pond>
- [9] Spinosa, L., Ayol, A., Baudez, J. C., Canziani, R., Jenicek, P., Leonard, A., Rulkens, W., Xu, G., van Dijk, L. „*Sustainable and Innovative Solutions for Sewage Sludge Management*” Water, 3, pp. 702-717, 2011
- [10] Czajczyńska, D., Anguilano, L., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Reynolds, A. J., Spencer, N., Jouhara, H., „*Potential of Pyrolysis Processes in the Waste Management Sector*”, Thermal Science and Engineering Progress, 2017
- [11] De Blasio, C., Prestipino, M., Galvagno, A., Björklund-Sänkiaho, M. „*An Assessment of Operating Conditions for Supercritical Water Gasification and Safety Issues*” Proceedings of the 5th World Congress on New Technologies (NewTech'19), 2019
- [12] Pinkard, B. R., Gorman, D. J., Tiwari, K., Rasmussen, E. G., Kramlich, J. C., Reinhall,

- P. G., Novosselov, I. V. „*Supercritical water gasification: practical design strategies and operational challenges for lab scale, continuous flow reactors.*” Heliyon 5, e01269, 2019
- [13] Pioro, I., Mokry, S. „*Thermophysical Properties at Critical and Supercritical Pressures, Heat Transfer - Theoretical Analysis*” Experimental Investigations and Industrial Systems, Prof. Aziz Belmiloudi (Ed.), ISBN: 978-953-307-226-5, InTech, 2011
- [14] Hujber O. „*A szennyvíztelepek karbon lábnyomának csökkentése a rothasztott iszapok szuperkritikus vizes feldolgozásával és a biogáz szén-dioxid tartalmának biometánná alakításával*” A Magyar Hidrológiai Társaság lapja, 101. évf., 3. szám. pp. 67-74, 2021
- [15] Lowman, A., Wing, S., Crump, C., MacDonald, Pia D.M., Heaney, C., Aitken, M. D. „*Public Officials’ Perspectives on Tracking and Investigating Symptoms Reported Near Sewage Sludge Land Application Sites*” Journal of Environmental Health, Vol. 73, No. 6, pp. 14-21, 2011
- [16] Kruse, A. „*Supercritical water gasification*” Wiley InterScience, Biofuels, Bioprod. Bioref. 2:415–437, 2008
- [17] Marrone, P. A., Hong G. T. „*Corrosion control methods in supercritical water oxidation and gasification processes*” J. of Supercritical Fluids 51, pp. 83–103, 2009
- [18] Xu, D., Wang, S., Tang, X., Gong, Y., Guo, Y., Wang, Y., Zhang, J. „*Design of the first pilot scale plant of China for supercritical water oxidation of sewage sludge*” Elsevier, chemical engineering research and design 90, pp. 288–297, 2012
- [19] Pinczés Zs., „*Veszélyes hulladékok szuperkritikus-vizes oxidációval történő megsemmisítése,*” Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2021.
- [20] Yakaboylu, O., Harinck, J., Smit, K. G., de Jong, W. „*Supercritical Water Gasification of Biomass: A Literature and Technology Overview*” Energies, 8, pp. 859-894; doi:10.3390/en8020859, 2015
- [21] Special Metals „*Inconel Alloy 740H*” <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-740h.pdf> 2023.01.18.
- [22] Boukis, N., Galla, U., Müller, H., Dinjus, E. „*Biomass Gasification in Supercritical Water. Experimental Progress Achieved with the Verena Pilot Plant*” 15th European Biomass Conference & Exhibition, Berlin, Germany, 2007

- [23] Kruse, A. „*Hydrothermal biomass gasification*” Elsevier, Journal of Supercritical Fluids 47, pp. 391–399, 2009
- [24] Reimer, J., Peng, G., Viereck, S., De Boni, E., Breinl, J., Vogel, F. „*A novel salt separator for the supercritical water gasification of biomass*” Elsevier, Journal of Supercritical Fluids 117, pp. 113–121, 2016
- [25] Marrone, P. A., Hodes, M., Smith, K. A., Tester, J. W. „*Salt precipitation and scale control in supercritical water oxidation—part B: commercial/full-scale applications*” Elsevier, Journal of Supercritical Fluids 29, pp. 289-312, 2004
- [26] Barótfi I., „*Környezettechnika*” Mezőgazda Kiadó, 2000
- [27] Stratégia 2014 Konzorcium „*Szennyvíziszap Kezelési és Hasznosítási Stratégia 2014-2023*” 2013
- [28] Kárpáti Á. „*A rothasztás ABC-je*” MASZESZ Hírcsatorna, 2018
- [29] Biopsol „*Szennyvíziszap*” http://biopsol.hu/30_szennyviziszap 2023.01.31.
- [30] Glossary of Statistical Terms „*Population Equivalent (in waste-water monitoring and treatment)*” <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=2086> 2023.01.31.
- [31] Lajos T. „*Az áramlástan alapjai: Előadási jegyzet*” Budapest Műszaki Egyetem, Áramlástan Tanszék, 1992
- [32] Szabó D. I. „*Biogáz üzem energetikai értelmezése és életciklus elemzése*” Szent István Egyetem, Gödöllő, 2014
- [33] Zorg Biogas GmbH egyedi árajánlata, 2022.10.05.
- [34] Hujber O., Poós T. „*Biogáz üzemek P2G és SCWG-HU technológiával történő fejlesztése*” Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, 2023
- [35] Nevzorova, T., Kutcherov, V. „*Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review*” Energy Strategy Reviews 26 100414, 2019
- [36] Hujber O. „*A szennyvíztelepek energetikai önellátásának megteremtése a szennyvíziszapok szuperkritikus vizes elgázosításával; A SCWG-HU technológia alkalmazásában rejlő lehetőségek*” 2023
- [37] Beadomgaal minta „*Bioetanol*” <https://sites.google.com/site/beadomgaalminta/> 2023.03.31.
- [38] Agrarpalyazat.eu „*Amit egy állattenyésztőnek a trágyával kapcsolatban tudni kell*” http://agrarपालयazat.eu/wp-content/uploads/2015/11/tragya_mas_z_fvm_kiadvany.pdf

7 Mellékletek

